

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
SÄHKÖTEKNIIKAN OSASTO

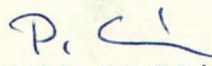
TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI S.A.
02150 ESPOO

17694

Markku Pehkonen

ERÄÄN MIKROPROSESSORIPOHJAISEN SULAUTETUN
OHJAUSJÄRJESTELMÄN LAITTEISTON SUUNNITTELU

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä
tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 29.12.1985


Työn valvoja: apul.prof. Pekka Wallin
Työn ohjaaja: dipl.ins. Olli Rissanen

Tekijä ja työn nimi : Markku Pehkonen

Erään mikroprosessoripohjaisen sulautetun
ohjausjärjestelmän laitteiston suunnittelu

Päivämäärä : 27.12.1989

Sivumäärä : 63 s.

Osasto :

Professuuri :

Sähkötekniikan osasto

Ele-66a Mittaustekniikka

Työn valvoja : apul.prof. Pekka Wallin

Työn ohjaaja : Dipl.ins. Olli Rissanen

Tässä diplomityössä kerrotaan sulautetun ohjausjärjestelmän laitteiston suunnittelusta ja toteutuksesta sekä tarkastellaan laitteiston luotettavuuteen vaikuttavia seikkoja.

Työn alkuosa muodostuu laitteistolle asetetuista yleisistä vaatimuksista, toteutetusta rakenteesta sekä luotettavuustarkastelusta. Luotettavuustarkastelussa kiinnitetään erityistä huomioita väylärakenteeseen, komponenttien valintaan sekä kahdennuksien vaikutuksiin.

Luotettavuutta arvioidaan kahdella MIL-HDBK-217-käsikirjaan pohjautuvalla laskelmalla, joista toisessa on sovellettu vertailumielessä kokemuseräistä tietoa komponenttien elinijistä. Laskelmien tulokset ja kahdennuksien vaikutus esitetään luotettavuuslohkokaavion avulla.

Työn loppuosa kertoo laitteiston pääosien suunnittelusta ja toteutuksesta erityisesti valitun väylärakenteen pohjalta.

ALKULAUSE

Tämän diplomityön valvojana on toiminut apul.prof. Pekka Wallin, jota kiitän työni tukemisesta.

Työn ohjaajana toimineelle dipl.ins. Olli Rissaselle haluan osoittaa kiitoksen niistä lukuisista hyvistä neuvoista, joita sain tätä työtä tehdessäni. Kiitoksen ansaitsevat myös työtoverit ja ystävät, jotka ovat jaksaneet odottaa valmistumiseni edistymistä.

Lisäksi haluan kiittää Elina Pekkasta huolellisesta ja kärsivällisestä oikoluennasta.

Espoossa, 27. joulukuuta 1989



Markku Pehkonen

Iivisniemenaukio 2 D 38
02260 Espoo

Sisällysluettelo

1. Johdanto	1
2. Yleistä	2
2.1 Vaatimukset ja käyttö	2
2.2 Laitteiston rakenne	2
2.3 Rajoitukset	6
3. Luotettavuus	7
3.1 Komponenttien valinta	7
3.2 Väylärakenne	9
3.3 Kahdennuksien suunnittelu	10
3.4 Luotettavuusennuste	12
3.5 Laatumerkittävien modifiointi	16
3.6 Vikamekanismin kriittisyys	18
4. Keskusyksikkö (CPU)	21
4.1 Vaatimukset	21
4.2 Väylät	22
5. Modeemi	27
5.1 Vaatimukset	27
5.2 Modeemien välinen liikennöinti	28
5.3 Modeemin ohjelmointi	29
5.4 Väylät	30
5.5 Modeemin ja CPU:n välinen liikennöinti	31
5.6 Linjakytkimien valinta	33
5.7 Modeemipuskuri	35
6. Analogia-digitaalimuunnin	36
6.1 Vaatimukset	36
6.2 Analogiatulosten mittaus	36
6.3 A/D-muuntimen liikennöinti	38

7. Digitaalitulot	40
8. Digitaalilähdöt	41
9. Solumatriisipiiri (LCA)	43
10. Parametrimuisti	45
11. Tietokoneliitäntä	46
12. Teholähde	47
13. Akkuliitäntä	50
14. Laitteiston käynnistys	53
14.1 Keskusyksikön ja modeempiirien alkuasetus	53
14.2 LCA-piirien alkuasetus	55
15. Hätäpysäytys (ESD)	57
15.1 Hallittu hätäpysäytys	57
15.2 Hallitsematon hätäpysäytys	58
16. Yhteenveto	60
17. Lähdeluettelo	62

Liitteet

- Liite 1. Luotettavuuslaskelma 1
- Liite 2. Luotettavuuslaskelma 2

KÄYTETYT LYHENTEET JA KÄSITTEET

bps	bittiiä sekunnissa
CPU	Central Prosessing Unit = keskusyksikkö
1 dBmO	Jänniteyksikkö, joka saadaan 1 mW:n teholla 600 ohmin impedanssissa
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory = sähköisesti tyhjennettävä lukumuisti
EPLD	Erasable Programmable Logic Device = Tyhjennettävissä oleva ohjelmoitava logiikkapiiri
ESD	Emergency Shut Down = häätäpysäytys
FIT	Failures In Time = vikataajuuden yksikkö
GB	Ground Bening = MIL-HDBK-217E:n ympäristöluokitus
HDLC	High level Data Link Control = standardisoitu yhteyskäytäntö tiedonsiirrossa
LCA	Logic Cell Array = Ohjelmoitava solumatriisipiiri
MIL-STD	USA:n puolustusministeriön standardi
MIL-HDBK	Military Handbook = USA:n puolustusministeriön julkaisu
MTBF	Mean Time Between Failure = keskimääräinen vikaväli
PAL	Programmable Array Locig = Ohjelmoitava logiikkapiiri
PLD	Programmable Logic Device = Ohjelmoitava logiikkapiiri
PSK	Phase Shift Key, vaihemodulointi
PROM	Programmable Read Only Memory = ohjelmoitava lukumuisti
RS-232C	Standardisoitu tiedonsiirtoväylä

1. Johdanto

Tässä työssä kerrotaan erään tuotannonohjaukseen tarkoitettun mikroprosessoripohjaisen sulautetun järjestelmän laitteiston suunnittelunäkökohdista ja toteutuksesta. Ohjelmiston toteutusta ei käsitellä tässä työssä kuin niiltä osin, kuin toiminnan ymmärtämiseksi on tarpeellista.

Suunnittelussa on kiinnitetty erityistä huomiota luotettavuuteen komponenttivalintojen, kahdennuksien ja arkkitehtuurin kannalta sekä laskettu teoreettinen elinikä kahdella vertailevalla menetelmällä. Laitteiston arkkitehtuuri perustuu keskusyksikön ja ohjelmoitavien solumatriisipiirien avulla toteutettuun poikkeavaan väylärakenteeseen. Perinteinen rinnakkaismuotoisen jaetun väylän käyttöön pohjautuva arkkitehtuuri on korvattu erikoistuneilla tahdistetuilla sarjamuotoisilla väylillä, jotka toimivat toisistaan riippumatta. Laitteiston arkkitehtuuria voidaan perustellusti kutsua väyläorientoituneeksi.

Erillisillä väylillä estetään jonkin väylään kuuluvan oheispiirin vikaantumisesta aiheutuva koko järjestelmän vikaantuminen. Lisäksi laitteiston luotettavuutta kuvaavat mallit yksinkertaistuvat, jolloin toimintojen luotettavuutta voidaan helpommin arvioida kuin rinnakkaisväylän tapauksessa. Koska keskusyksikön ohjelmamuisti sijaitsee kokonaisuudessaan keskusyksikköpiirin sisällä, tarvetta rinnakkaiseen muistiin ja väylään ei ole.

Laitteiston kriittisiä osia on kahdennettu luotettavuuden parantamiseksi. Kahdennuksissa on sovellettu sekä aktiivista että passiivista menetelmää, joiden vaikutusta kokonaisluotettavuuteen on tutkittu luotettavuuslohkokaavion avulla. Lisäksi suunnittelussa on kiinnitetty erityistä huomiota siihen, miten prosessi vian tai vaaratilanteen vuoksi voidaan ohjata varmasti tiettyyn tunnettuun tilaan.

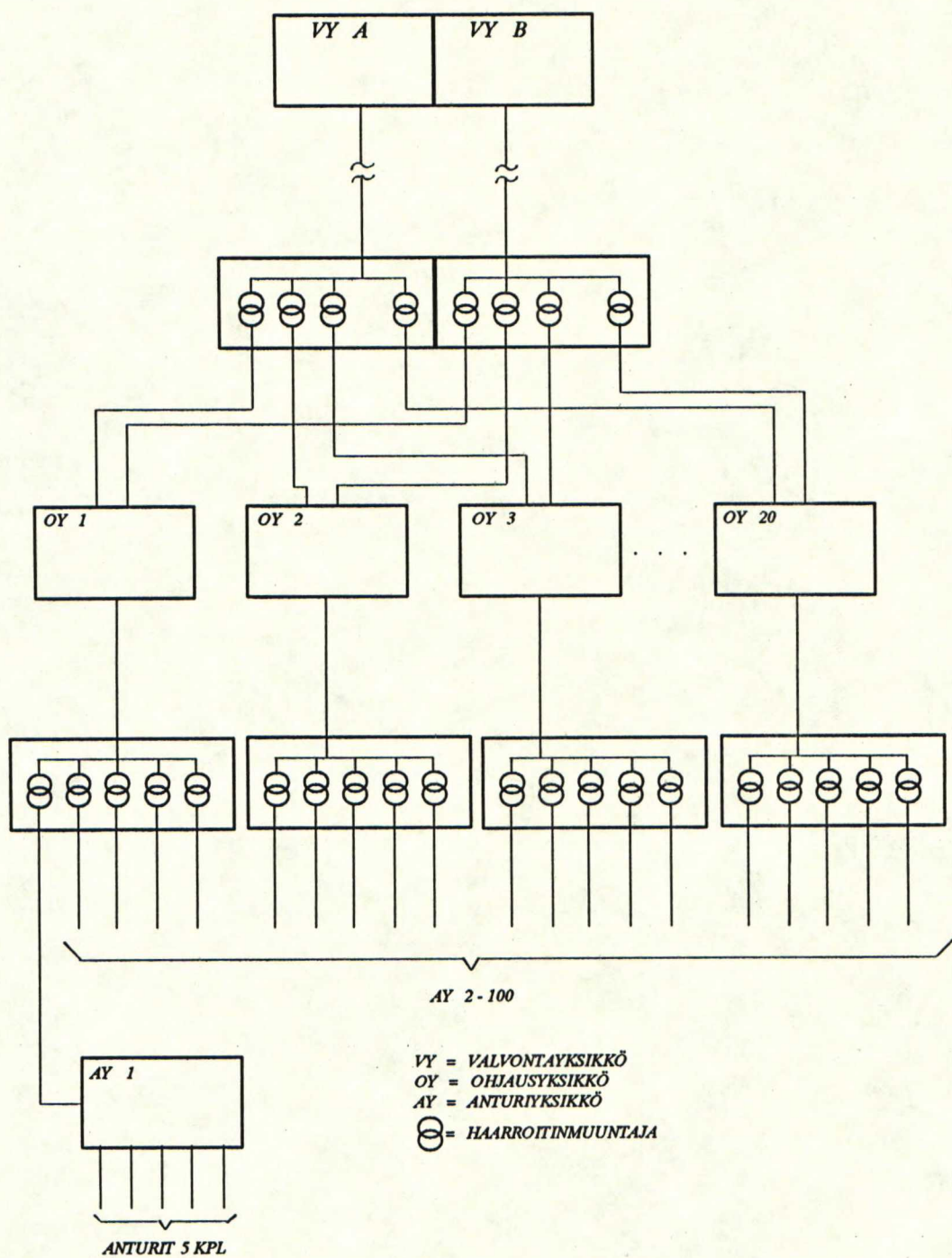
2. Yleistä

2.1 Vaatimukset ja käyttö

Laitteisto on tuotannonohjaukseen tarkoitettu mikroprosessoripohjainen sulautettu järjestelmä, jonka luotettavuuteen on kiinnitetty erityistä huomiota. Laitteiston tuli kyetä ohjaamaan tavanomaisia tasajännitereleillä toimivia toimilaitteita (enint. 64 kpl) sekä mitata virtaviesti- (7) ja kytkintuloja (32). Laitteiston sijoittaminen jopa 20 km:n päähän valvontakeskuksesta piti toteuttaa modeemiyhteydellä. Lisävaatimuksina olivat pieni koko ja virrankulutus. Laitteiston tuli tarjota mahdollisuudet älykkään modeemiliikennöinti-protokollan ja riittävän vasteajan toteuttamiseen ohjelmistolla. Luotettavuusvaatimukseksi oli määritetty 95 % viiden vuoden aikana, joka vastaa MTBF-arvoa 97.5 vuotta. Toteutettua laitteistoa kutsuttakoon työssä ohjausyksiköksi.

2.2 Laitteiston rakenne

Teollisuuden tarpeisiin ohjausjärjestelmä on hajautettavissa liittämällä kortilla olevan modeemin avulla ohjausyksikkö yhteen tai useampaan samanlaiseen ohjausyksikköön, joista yksi voi toimia keskusvalvomona tietokoneeseen liitetynä. Tällaista ohjausyksikköä kutsuttakoon työssä valvontayksiköksi. Lisäksi ohjausyksikkö voidaan yhdistää modeemiliitännällä yksinkertaistettuun ohjausyksikköön, jonka tehtävänä on pelkästään analogiatulojen mittaus. Tällaista laitetta kutsutaan työssä anturiyksiköksi. Esimerkki hajautetun järjestelmän toteutuksesta on esitetty lohkokaavion muodossa kuvassa 2.1. Kuvan rakenne muodostui asiakasyrityksen tuotantojärjestelmän vaatimusten pohjalta.



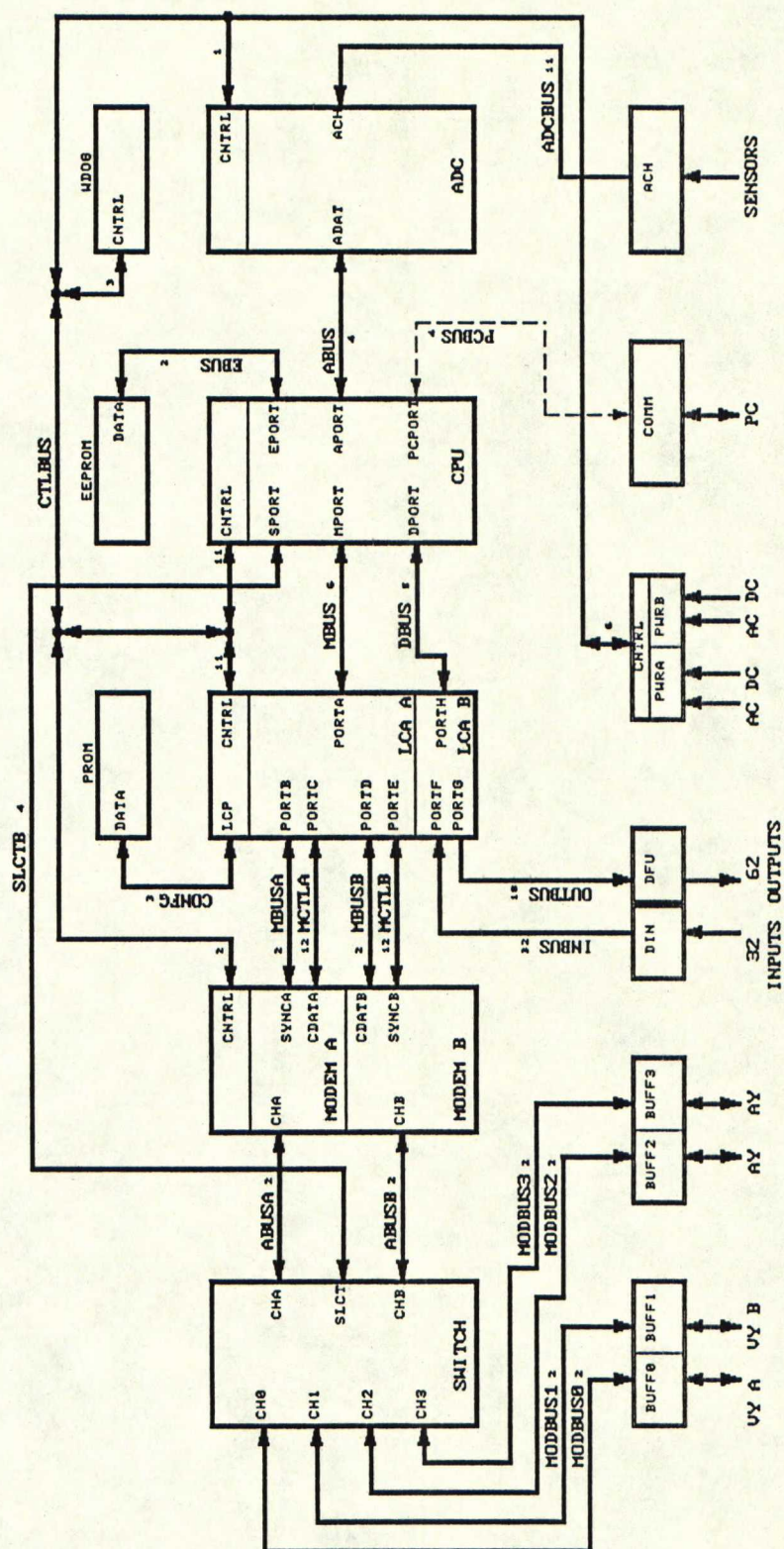
Kuva 2.1 Hajautettu ohjausjärjestelmä

Ohjausyksikkö koostuu kuvan 2.2 lohkoista ja niiden välisestä väylistä. Laitteen sydämenä on keskusyksikkö (CPU) kuuden väylänsä välityksellä. LCA-lohko koostuu kahdesta LCA-piiristä ja niiden alustukseen tarvittavasta lukumuis-tista (PROM). LCA-lohkon tehtävänä on tiedonsiirron väli-tys modeemin ja CPU:n välillä, modeemien ohjelmoinnissa tarvittavien signaalien ajoitus sekä lähtö- ja tulotietojen välitys lähtöpuskurin (DFU) ja tulopuskurin (DIN) sekä CPU:n välillä.

Modeemilohko (MODEM) koostuu kahdesta identtisestä modeemi-piiristä, joista jompi kumpi voidaan valita aktiiviseksi. Modeemilohkon tehtävänä on muuttaa CPU:n (LCA-lohkon kaut-ta) lähettämä asynkroninen digitaalinen tieto analogiseksi PSK-moduloiduksi kantaalloksi sekä toisaalta muuttaa vas-taanotettu kantaalto asynkroniseen digitaaliseen muotoon. Kytkinlohko (SWITCH) yhdistää modeemin johonkin neljästä lähetys-vastaanottopuskurista (BUFF0-3), joiden tehtävänä on kantaallon vahvistus, suodatus ja ylijännitesuojaus. BUFF0 ja BUFF1 on varattu liikennöinnille valvontayksikön kanssa; BUFF2 ja BUFF3 on varattu anturiyksiköille.

Parametrimuistissa (EEPROM) säilytetään prosessin ohjauk-sessa tarvittavia parametreja. Vahtikoiralohkon (WDOG) tehtävänä on laitteiston käynnistys ja ohjelmiston toimin-nan tarkkailu. Analogia-digitaalimuuntimen (ADC) avulla voidaan lukea laitteeseen kytkettyjä virtaviestituloja, jotka suodatetaan ja muutetaan jännitteeksi ACH-lohkossa. Valvontayksikön liittäminen tietokoneeseen onnistuu RS-232C-puskurin (COMM) avulla.

Laitteiston tehon syötöstä huolehtii teholähde, joka on luotettavuuden lisäämiseksi kahdennettu (PWRA, PWRB). Sen tehtävänä on tasasuunnata, suodattaa ja reguloida syötetty vaihtojännite kortin tarvitsemaksi tasajännitteeksi sekä huolehtia akun kytkemisestä, lataamisesta ja purkamisesta.



Kuva 2.2 Ohjausyksikön rakenne

2.3 Rajoitukset

Vaikka hajautetun ohjausjärjestelmän toteutus onnistuu laitteistossa olevan modeemin avulla, laitteen kytkeminen puhelinverkkoon ei onnistu. Modeemista puuttuu kaikki ne ominaisuudet, jotka tarvitaan puhelinyhteyden muodostamiseen ja lopettamiseen. Ohjausjärjestelmä on siis johdotettava erillisillä kaapeleilla, jotka ovat irrallaan puhelinverkosta. Tehonsyöttökaapeloinnin käyttämistä tiedon siirrossa rajoittaa lähinnä verkon impedanssin voimakas vaihtelu /1/.

Käytetty 1200 bps:n liikennöintinopeus estää laitteiston käytön nopeita vasteaikoja vaativissa järjestelmissä. Koejärjestelmässä päästiin 20 sekunnin vasteaikoihin, kun laitteisto oli koottu kuvan 2.1 mukaisesti. Tästä nopeuttaminen onnistuu vain tehokkaamman CPU:n ja nopeamman modeemin avulla. Lisäksi ohjelmiston toteutus onnistui käyttämällä ainostaan hidasta vuorosuuntaista liikennöintiä. Tämä helpottaa testausta ja samomaliikenteen seurantaa mutta pidentää ohjausten vasteaikoja. Ongelma johtui modeemipuskurin rakenteesta, jossa lähetetty kantoaalto kytkeytyy voimakkaasti vastaanotettuun kantoaaltoon ja sekoittaa sanoman. Kaksisuuntainen liikennöinti olisi onnistunut suunnittelemalla monimutkainen modeemipuskuri, jossa lähetetty kantoaalto ei sekoita modeemin vastaanottoa.

Ohjausjärjestelmän laajuuden ollessa kuvan 2.1 mukainen, liikennöinti saatiin toimimaan 25 km:n etäisyydelle asti ilman välivahvistimia, vaikka ylikuulumisilmiön saattoi olettaa aiheuttavan ongelmia saman vaipan sisälle johdettuun moninkerroin edestakaisin kulkevaan signaaliin. Pidempää kaapelia testaukseen ei ollut käytettävissä. Bittivirhesuhde pysyi hyvänä myös tällä etäisyydellä ($< 10^{-5}$).

3. Luotettavuus

Laitteiston luotettavuussuunnittelussa on pyritty kiinnittämään huomiota seuraaviin kohtiin: komponenttien valinta, väylärakenne ja kahdennuksien vaikutus. Koska luotettavuusongelma on erittäin laaja, työssä ei tutkita sellaisia olennaisia asioita kuin rasituksen mitoittaminen, toleranssitarkastelu, lämpösuunnittelu ja sähköiset häiriöt. Näistä asioista on kerrottu mm. viitteessä /2/.

3.1 Komponenttien valinta

Viallisten komponenttien eliminointia voidaan helpottaa kahdella tavalla: Ostamalla valmistajalta valikoituja tiukan laatutarkastuksen läpikäyneitä komponentteja tai testaamalla komponentit itse.

Ensin mainittu tapa tuotti ongelmia komponenttien saatavuuden ja hinnan kanssa. Koska luotettavuussuunnuste pohjautuu perusteellisimpaan tunnettuun malliin (MIL-HDBK-217E) /3/ pyrkimys oli ensin löytää MIL-luokituksen saaneita komponentteja. Näiden saatavuus on kuitenkin työn kaltaisiin pieniin tuotekehitysprojekteihin olematon. Lisäksi näiden komponenttien hinta ylitti moninkertaisesti budjetin salliman ylärajan, mm. tantaalikondensaattoreiden hinta nousi enemmän kuin kaksinkertaiseksi siirryttäessä laatu-luokituksessa aina seuraavaan laadukkaampaan luokkaan. MIL-HDBK-217E:n mukaisen laatu-luokituksen saaneita komponentteja ei myöskään välttämättä lainkaan ole olemassa. Toinen vaihtoehto oli löytää eurooppalaisia laatu-standardia täyttäviä komponentteja amerikkalaisten sijaan. Tästä aiheutui ongelmia eurooppalaisten ja amerikkalaisten laatu-luokitusten vastaavuuksista. Viitteissä /4/ ja /5/ on melko kattava yhteenveto amerikkalaisten MIL-standardien ja CECC-standardien vastaavuuksista. Eurooppalaisten kompo-

nenttien saatavuus on jonkin verran parempi, mutta hinta-
taso on samaa luokkaa kuin MIL-komponenttien.

Japanilaisilla ei ole eurooppalaisten ja amerikkalaisten kanssa yhteneviä laatuluokituksia mikä vaikeuttaa japanilaisten komponenttien käyttöä, mikäli laskentaperusteena halutaan käyttää puhtaasti käsikirjassa esitettyä mallia. Tämä ei kuitenkaan merkitse sitä, että japanilaiset komponentit olisivat laadultaan heikompia - luotettavuustietojen saaminen vain on yleensä vaikeampaa.

Komponenttien testaaminen itse on työn kaltaisessa tuotekehitysprojektissa taloudellisesti mahdotonta, mutta isommis-
sa tuotantosarjoissa ehdottomasti suositeltavaa. Komponenttien testaaminen itse ei ole kattavaa mikäli testausta ei suoriteta jo valmistusvaiheessa - vrt. esim. visuaalinen tarkistus. Valmistajan testiohjelman ja oman testiohjelman tasapainoinen sovittaminen on hyvä lähtökohta. Lisäksi voi käyttää kokemusperäistä tietoa hyväksi, kun halutaan kehittää komponenttien testausmenetelmiä tai arvioida komponenttien luotettavuuksia. Lähteessä /6/ on kerrottu elektronikan komponenttien luotettavuustietojen määrittämisestä ja tietopankeista, joista ainakin EXACT:n kautta on mahdollisuus saada tietoja komponenttien testimenetelmistä ja niiden tuloksista. Valmistajan tekemistä testiohjelmista on kerrottu esim. viitteissä /4/ ja /5/.

Pitkien ja suurten tuotantosarjojen yhteydessä on erinomainen tilaisuus kerätä aineistoa komponenttien elinijistä. Nykyinen suuntaus ainakin teollisuuden ohjausjärjestelmissä on valitettavasti kuitenkin se, että tuotteen elinkaari on erittäin lyhyt ja vaikeuttaa näin aineiston keräämistä.

Komponenttien kotelotyyppi on syytä valita keraamiseksi, (tai metallinen) mikäli on pelkoa kohenneista lämpötiloista tai kosteuden pääsystä laitteiston sisälle. Muovikuoristen

komponenttien kestävyys on kuitenkin vuosien kuluessa huomattavasti parantunut laadukkaampien materiaalien ansiosta. MIL-HDBK-217:n mukaan keraamiset integoidut piirit ovat noin kaksi kertaa luotettavampia (pienissä lämpötiloissa) kuin muovikuoriset /3, taulukko 5.1.2.7/. Lämpötilan kasvassa erokin suurenee. Useimmat piirivalmistajat eivät ilmoita erikseen muovisten ja keraamisten komponenttien luotettavuuksia mutta lähteen /7, s.5-2/ mukaan keraaminen kotelo antaa CMOS-piirille lämpötilasta riippuen 3 - 4 kertaa paremman luotettavuuden kuin muovinen.

3.2 Väylärakenne

Jaetun rinnakkaisen osoite-dataväylän ongelmana on usein sen kyvyttömyys kestää jonkin väylään liittyneen oheispiirin vikaantumisen aiheuttama koko väylän toimintakyvyttömyys. Työssä otettiin radikaalisti käyttöön kokonaan toisenlainen tapa liittää oheispiirit keskusyksikköön: Jokainen oheispiiri on liitetty keskusyksikköön omalla irrallisella sarjamuotoisesti liikennöivällä toisistaan riippumattomalla väylällä.

Väylien toimintaperiaate on kaikilla sama. Tieto siirtyy kellosignaalin tahdistamana väylän datalinjaa pitkin sarjamuotoisesti. Väylän toteuttamiseksi tarvitaan siis välttämättä vain kaksi linjaa: data- ja kello tahdistuslinja. Mikäli datalinja on kaksisuuntainen, tarvitaan lisäksi kolmas signaali kertomaan datan kulkusuunnasta. Tämän lisäksi on tarpeellista lisätä väylään signaali, joka kytketään oheispiirin valintaan (chip select). Tämä estää datan siirtymisen esim. satunnaisesti ja virheellisesti syntyvän kellosignaalin yhteydessä. Näin väylä voi sisältää kaikkiaan viisi linjaa, mikäli tulevalle ja lähtevälle datalle varataan omat linjansa. Väylän nopeuden määrää kellopulslien taajuus, jonka ei tarvitse välttämättä olla

vakio - seikka mikä sallii tiedon siirron keskeyttämisen hetkellisesti esim. keskusyksikölle tulevan keskeytyksen yhteydessä.

Sarjamuotoinen väylä saadaan helposti aikaan keskusyksikön ohjelmoitavilla tulo-lähtöporteilla, joita on kaikkiaan 40 kpl. Portit voidaan ohjelmallisesti liittää kohtalaisen nopeaan sarjamuotoiseen väylään, joita monissa oheispiireissä on valmiina. Tällaisia piirejä on DCU-kortilla sarjamuotoisesti liikenoivat parametrimuisti (Eeprom), analogia-digitaalimuunnin sekä modeemipiiri. Digitaaliset tulot on luettavissa sarjamuotoisesti LCA-piirille ohjelmoidun rinnakkais-sarjamuuntimen avulla. Digitaaliset lähdöt siirretään samoin sarjamuotoisesti samalla LCA-piirillä olevalla sarja-rinnakkaismuuntimella kortin lähtöihin.

3.3 Kahdennuksien suunnittelu

Kahdentamalla kriittisiä osia voidaan laitteiston luotettavuutta parantaa. Tämä edellyttää kuitenkin, että kahdennus on oikein suunniteltu. Kahdennusmenetelmistä on kerrottu mm. lähteissä /2/ ja /8/.

Kahdennettavaksi kannattaa valita luotettavuuden kannalta kriittiset osat. Tällaisia ovat mm. suuren teho-, jännite-, virta-, tai mekaanisen rasituksen kohteeksi joutuvat osat. Suunnittelun alkuvaiheessa havaittiin, että ainakin teholähde on erittäin kriittinen osa sen joutuessa kaikkien em. rasitusten kohteeksi. Kriittisiä komponentteja ovat myöskin tiedonsiirtoon osallistuvat komponentit - jos jokin niistä hajoaa koko laitteen toiminta estyy. (Esimerkikiksi A/D-muuntimen hajoaminen ei estä ohjaamasta digitaalisia lähtöjä, koska yhteys valvomoon edelleen toimii.) CPU:n kahdentaminen on vaikeaa rikkomatta yksinkertaisuuden sään-

töä, sen sijaan modeemipuskurien ja modeemipiirien kahdentaminen oli helppoa koska ne liittyvät muuhun järjestelmään vain kahden linjan (tuleva ja lähtevä data) avulla.

Teholähde kahdennettiin käyttämällä aktiivista menetelmää, jossa molemmat teholähteet syöttävät jatkuvasti virtaa laitteistolle. Vaikka passiivinen kytkimellä ohjattu kahdennus teoriassa saattaa antaa paremman tuloksen, käytännössä asia on usein toisin. Kytkimen on oltava erittäin luotettava, jotta oleellista parannusta saadaan aikaan - toisaalta aktiivisen menetelmän takia tehorasitus jakaantuu puoliksi molempien teholähteiden kesken ja parantaa sitä kautta luotettavuutta merkittävästi.

Modeemipuskureiden kahdentamisessa päädyttiin kompromissiin aktiivisen ja passiivisen kahdennuksen välillä. Sovittiin että kantoaalto lähetetään valvontayksikölle aina kahta linjaa pitkin, jolloin siis kaksi modeemipuskuria on aktiivisina rinnankytkettyinä. Sen sijaan kantoaallon vastaanotto (kuuntelu) toimii passiivista kahdennusta hyväksien käyttäen, jolloin keskusyksikkö odottelee sanomaa ensin toiselta modeemipuskurilta. Mikäli sanomaa ei kuulu keskusyksikkö ohjaa kytkimen toiselle modeemipuskurille ja jos sanoma saadaan sieltä kytkin pysyy samassa asennossa.

Puskureiden lisäksi myös itse modeemit on kahdennettu. Mikäli sanomaa ei kuulu keskusyksikkö vaihtaa toisella kytkimellä modeemia. Tätä kytkimien avulla tapahtuvaa sanoman "metsästystä" jatkuu loputtomiin tai niin pitkään, että jollain neljästä modeemi-modeemipuskuriyhdistelmästä saadan yhteys valvontayksikköön. Yhteyden kahdentaminen anturiyksikköön toimii täsmälleen samalla tavalla.

Tulojen kahdentaminen suoritettiin yksinkertaisesti lisäämällä tulonapojen määrää tarpeeseen nähden kaksinkertaiseksi, jolloin käyttäjällä on mahdollisuus kytkeä samalta

toimilaitteelta kaksi rinnakkaista sisääntuloa. Käyttäjän ongelmaksi tosin jää päättää kumpi kahdesta tulotiedosta on oikea, mikäli ne poikkeavat toisistaan. Sovelluksissa, joissa halutaan luotettavasti hälytys siitä, että jotain saattaa olla vialla, tämän kaltainen kahdennus on paikallaan.

Lähtöjen kahdentaminen onnistuu kuten tulojenkin, mutta vaatii ohjattavalta laitteistolta joustavuutta. Usein toimilaitteiden tai niiden ohjauksien kahdentaminen on vaikeaa prosessin luonteesta jouhtuen.

Analogiatulojen kahdentamisessa käytettiin erikoista ja joustavaa ratkaisua. Modeemipuskureita lisättiin vielä kaksi lisää (BUFF2 ja BUFF3) alunperin suunniteltujen kahden lisäksi (BUFF0 ja BUFF1). Näin voitiin suunnitella modeemiliitännällä toimiva anturiyksikkö, joka kykenee toimimaan pitkänkin matkan päässä varsinaisesta laitteistosta. Keskusyksikkö voi edellä kuvattuun tapaan kytkimillä ohjata modeemilinjan siihen asentoon, että viestinvälitys anturiyksikölle toimii.

3.4 Luotettavuusennuste

Luotettavuus on laskettu MIL-HDBK-217E-käsikirjan mallin ja sitä hyödyntävän ELCOM-ohjelmiston avulla kahdella eri periaatteella. Vertailevat laskelmat on esitetty liitteissä 1 ja 2. Liitteen 1 laskelma on tehty puhtaasti käsikirjan mukaisesti, sen sijaan jälkimmäinen laskelma on saatu modifioimalla komponenttien laatukertoimia (quality factor) valmistajan ilmoittaman MTBF-arvon mukaisiksi. Tähän käsikirjan malli antaa periaatteessa täyden mahdollisuuden, koska laatukerroin on muokattavissa kokemusperäisen tiedon perusteella millaiseksi tahansa. Laatukertoimen modifiointia on käsitelty tarkemmin seuraavassa luvussa. ELCOM-

ohjelma sallii myös vikamekanismin kriittisyyden otettavaksi huomioon kunkin komponentin vikataajuutta laskiessa. Tästä ominaisuudesta on kerrottu luvussa 3.6.

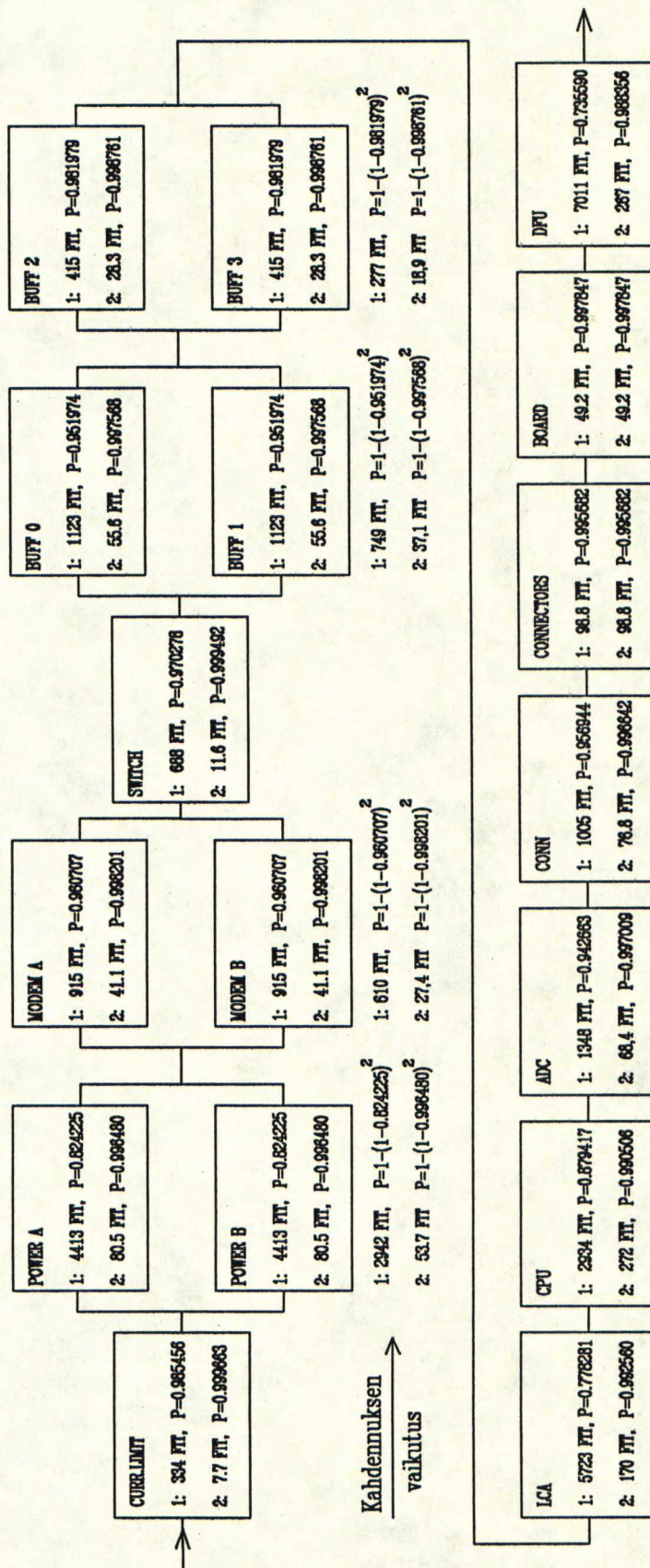
Molemmilla laskentamenetelmillä on omat epävarmuustekijänsä. Ensiksi mainitulla menetelmällä saatu ennuste on teollisuudessa havaittu varsin pessimistiseksi - lisäksi USA:n puolustusministeriön alaisuudessa laadittu MIL-HDBK-217-käsikirja on aina jonkin verran vanhentunut, vaikkakin uusia painoksia siitä ilmestyy muutaman vuoden välein. Käsikirja on laajin käytettävissä oleva malli elektroniikan komponenttien luotettavuuden ennustamiseen ja on sen tähden laajalle levinnyt. Muita luotettavuusmalleja on esitetty viitteessä /9/.

Jälkimmäisellä menetelmällä tehtyyn laskelmaan on suhtauduttava myöskin erittäin kriittisesti, koska valmistajan antamat elinikä tiedot ovat eräs tapa lisätä komponentin myyntiä ja saattavat se tähden olla turhan optimistisia. Testiympäristö saattaa myös poiketa todellisesta käyttöympäristöstä, joten tässäkin suhteessa valmistajan antamiin elinikä tietoihin kannattaa suhtautua epäillen. Tosin eräistä tunnetuista ja paljon käytetyistä piirisarjoista (kuten esim. 74HC-sarja) on olemassa niin paljon kokemuspäisiä tietoa, että ainakin suurten valmistajien antamiin elinikä tietoihin voi melko hyvin luottaa. Erilliskomponenteilla kuten transistoreilla vikamekanismit ovat paremmin eriteltävissä ja valmistaja saattaa ilmoittaa eliniän tietyille vikamekanismille testiympäristöolosuhteissa. Tämän tiedon soveltaminen sovelluksen käyttöympäristöön saattaa olla kuitenkin ongelmallista. Laskelmassa käytettiin tapaa, jossa merkittävimmän vikamekanismin elinikä tietojen perusteella käsikirjan antamia laatukertomuksia muutettiin siten, että käsikirjan antama tulos vastasi valmistajan antamaa tulosta mahdollisimman samanlaisessa käyttöympäristössä. Valmistajan testiympäristö luokitel-

tiin tällöin helpoimmaksi mahdolliseksi (Ground Bening), koska muutakaan tietoa ei ollut olemassa. Tämän jälkeen näin saatua laatukerrointa voidaan käyttää laskettaessa elinikiä todellisessa käyttöympäristössä.

Laitteiston luotettavuutta voidaan kuvata luotettavuuslohkokaaviolla (kuva 3.1). Lohkot kuvaavat ohjausyksikön eri osakokonaisuuksia ja niiden vaikutus luotettavuuteen riippuu siitä, ovatko ne systeemin kannalta rinnan- vai sarjankytkettyinä. Rinnankytkentä parantaa luotettavuutta ja kuvastaa osan kahdentamista. Sarjankytkentä kuvastaa sen sijaan tilannetta, jossa yhdenkin osan vikaantuminen aiheuttaa koko järjestelmän vikaantumisen. Ensimmäinen luku kussakin lohossa kuvaa liitteen 1 laskelman antamaa vikataajuutta ja luotettavuutta (=todennäköisyys, että laite on toimintakykyinen 5 vuoden kuluttua, /2, kaava 3.12/). Vastaavasti toinen lukema kuvaa liitteen 2 laskelman antamaa tulosta. Kokonaisvikataajuus ja -luotettavuus on laskettu molemmille tapauksille, joita vertaamalla havaitaan, että käyttäen valmistajan antamia vikataajuuksia apuna, päästään n. 20 kertaa pidempään elinikään. Luku olisi vieläin suurempi, jos kaikki laitteiston komponentit olisivat tavallisia kaupallisia komponentteja. Osa hankituista komponenteista oli MIL-hyväksyttyjä komponentteja, jotka antavat hyviä ennusteita molemmilla laskentatavoilla.

Ero laskelmien välillä tuntuu suurelta ja antaa miettimisen aiheita. Luotettavuusennusteen sisällyttämistä tuotespesifikaatioon on syytä harkita tarkoin - ainakin laskentaperusteet on selvitettävä asiakkaan kanssa ennen toimitus- tai suunnittelusopimuksen allekirjoitusta.

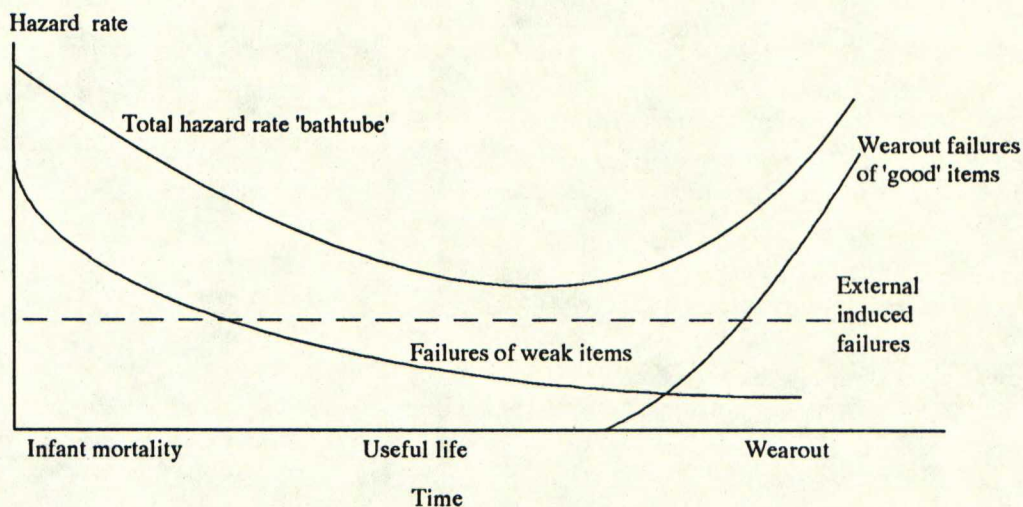


Kuva 3.1 Luotettavuuslohkokaavio

$$1: MTBF = 10^9 / (334 + 2942 + 610 + 688 + 749 + 277 + 5723 + 2834 + 1348 + 1005 + 98.8 + 49.2 + 7011)^4 = 4.2 \cdot 10^4 = 4.8 \text{ v.}, P(\text{tot}) = P(1) P(2) P(3) \dots P(n) = 0.416 / 5 \text{ v.}$$

$$2: MTBF = 10^9 / (7.7 + 53.7 + 27.4 + 11.6 + 37.1 + 18.9 + 170 + 272 + 68.4 + 76.8 + 98.8 + 49.2 + 287)^5 = 8.6 \cdot 10^4 = 98 \text{ v.}, P(\text{tot}) = P(1) P(2) P(3) \dots P(n) = 0.958 / 5 \text{ v.}$$

Koska laskennan antama erittäin suuri MTBF-arvo on sinänsä melko epähavainnollinen yksittäiselle tuotekehityssarjalle, olennaista on keskittyä pienentämään laitteen elinkaaren alkuvaiheessa olevien vikaantumisien eliminoimiseen kortti-
tasolla vanhentamalla piirikortteja kohotetussa lämpötilassa. Viitteessä /10/ on esimerkkejä elektroniikkateollisuuden rasituskarsinnasta. Elinkaaren alkuvaiheen vikojen osuutta koko laitteiston vioista esittää kuva 3.2. /8, s.8/



Kuva 3.2 "Kylpyammekäyrä"

3.5 Laatumerkintöjen modifiointi

Koska MIL-HDBK-217E-käsikirjan malli komponentin vikataajuuden laskemiseksi on osoittautunut liian pessimistiseksi (esim. useat suuret elektroniikkayritykset ovat hylänneet tämän tavan ennustaa komponenttien luotettavuutta), on työssä pohdittu menetelmää saada realistisempi arvio menetämättä kuitenkaan kokonaan sitä arvokasta tietoa, jonka käsikirja sisältää.

Ennusteen laskemisessa käytettiin hyväksi mahdollisuutta muuttaa komponentin vikataajuuden laskukaavoissa olevaa

laatukerrointa (quality factor), jota käsikirjan mukaan voidaan muuttaa kokemusperäisten tietojen pohjalta. Kokemusperäisiksi tiedoiksi on tässä vaiheessa hyväksytty myös valmistajan elinikätestien perusteella saadut vikataajuu-
det, koska kaupallisten komponenttien luotettavuudesta on erittäin vähän tarjolla valmista puolueetonta tietoa. Käytetty menetelmä ei tietysti ole tieteellisessä mielessä pätevä mutta antaa mielenkiintoisen vertailukohteen. Tämä menetelmä hyväksytään käytännössä useissa asiakasyrityksissä, koska muutakaan realistista laskentaperustetta on vaikea löytää.

Seuraavassa on esimerkin omaisesti kerrottu miten erään piirin vikataajuuks on saatu laatukerrointa modifioimalla. Esimerkkipiirinä olkoon yleinen CMOS-tekniikalla valmistettu kiikkupiiri 74HC74. Käsikirjan antama kaava digitaalisen CMOS-piirin vikataajuudelle on /3, s.5.1.2.1-1/:

$$\lambda_P = \pi_Q(C_1\pi_T\pi_V+C_2\pi_E)\pi_L \text{ vikaa}/10^6 \text{ t} \quad \text{kaava 3.1}$$

jossa	λ_P	on vikataajuuks
	π_Q	on laatukerroin
	π_T	on lämpötilan kiihdytyskerroin (vrt.aktivointienergia, kpl. 3.6)
	π_V	on jänniterasituskerroin
	π_E	on ympäristökerroin
	π_L	on teknologian kypsyyskerroin
	C_1 ja C_2	ovat kotelon kompleksisuuskertoimia, jotka riippuvat piirin ja kotelon rakenteesta

Sijoittamalla kaavaan käsikirjan taulukoiden antamat arvot 74HC74-piirille, saadaan tulos 94 FIT, kun lämpötila on 40 astetta ja teho 1mW. Käyttöympäristöksi on valittu helpoin

ympäristöluokka GB (Ground Bening), joka vastannee parhaiten valmistajan testiympäristöä. Tätä luokkaa vastaava $\pi_E = 0.38$. Laatukertoimenä on käytetty normaalia muovikotelon kaupallisen piirin kerrointa $\pi_Q=20$.

Valmistajan ilmoittama vikataajuus on 6 FIT 40 asteen lämpötilassa. Tätä lukua käytetään kokemusperäisenä tietona piirin vikataajuudesta kyseisessä lämpötilassa ja pienennetään laatukerrointa niin paljon, että kaava 3.1 antaa tulokseksi 6. Modifioiduksi laatukertoimeksi saadaan esimerkkitapauksessa täten $\pi_Q=1$. Tätä kerrointa voidaan tämän jälkeen käyttää muissa käyttöympäristöissä, jolloin käsikirjan malli pitää huolen komponenttiin kohdistuvien rasitusten vaikutuksesta vikataajuusennusteeseen.

3.6 Vikamekanismin kriittisyys

Mielenkiintoista oli tutkia miten käsikirjan mallin perusteella laskettu aktivointienergia suhtautuu valmistajan antamaan. Aktivointienergia on suure, joka kertoo miten voimakkaasti tietyn vikamekanismin vikataajuus riippuu lämpötilan muutoksesta.

Käsikirjassa se on otettu huomioon kertoimella π_T kaavassa 3.1. Puolijohteiden vikamekanismien lämpötilariippuvuus noudattaa Arrheniuksen reaktionopeusyhtälöä: /6, s.13/

$$R = R_0 e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad \text{kaava 3.2}$$

jossa	R	on reaktionopeus
	R_0	reaktiovakio
	E_a	vikamekanismin aktivointienergia
	k	Boltzmanin vakio
	T	lämpötila

Reaktionopeuksien suhde kahdessa tunnetussa lämpötilassa on sama kuin niiden vikataajuuksien suhde. Näin saadaan johdettua kaavasta aktivointienergian lauseke elektronivoltteina ilmaistuna:

$$E_a = \frac{k \ln(AF)}{q\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad \text{kaava 3.3}$$

jossa q on elektronin varaus

AF on vikataajuuksien suhde lämpötiloissa T_1, T_2

Vikataajuuksia täytyy tuntea siis kahdessa lämpötilassa, joiden perusteella aktivointienergia voidaan laskea. Kaavojen 3.1 ja 3.3 perusteella laskettuna 40 ja 75 asteen lämpötiloissa 74HC74-piirin aktivointienergia on 0.8 eV.

Valmistajan antaman ilmoituksen mukaan kyseisen piirin aktivointienergia on 1 eV, joskaan siinä ei kerrota miten tämä arvo on saatu. Työssä käytettyjen integroitujen CMOS-piirien aktivointienergiat vaihtelivat valmistajien ilmoitusten mukaisesti 0.7 ja 1.2 eV:n välillä.

Laskelman perusteella havaitaan, että valmistajan antama aktivointienergia vastaa suuruudeltaan melko hyvin laskettua arvoa. Kaikkien komponenttien kohdalla näin ei kuitenkaan ole laita. Erilliskomponenteille, kuten transistoreille aktivointienergia voidaan melko helposti todeta kullekin vikamekanismille erikseen. Tällöin on oleellista tutkia mille vikamekanismille komponentti sovelluksessa todennäköisimmin altistuu ja arvioida tämän perusteella komponentin luotettavuutta. Integroiduilla piireillä tällainen tarkastelu on usein vaikeata niiden monimutkaisuudesta johtuen, vaikka perusilmiöt voidaankin johtaa transistorin tasolle. Lähteissä /11-14/ sekä /15, s.4-20/ on esitetty eri vikamekanismien aktivointienergioita.

Koska aktivointienergia ja sen kertoma vikataajuuden riippuvuus lämpötilasta on yksi käsikirjan kulmakivistä, herää helposti epäilyks käsikirjan todellisesta käytännön merkityksestä vikataajuuksia arvioidessa sellaisissa tapauksissa, joissa kokeellisesti saatu aktivointienergia on jotain aivan muuta. On kuitenkin huomattava ettei työssä tutkittuilla komponenteilla harvalukuisuutensa perusteella ole tilastollista merkitystä. Lisäksi käsikirja edustaa objektiivisempaa lähestymistapaa kuin komponenttivalmistajien testitulokset.

ELCOM-ohjelman avulla tehdyssä luotettavuuslaskelmassa on yksinkertaisten komponenttien (so. ei integroitujen piirien) vikamekanismien kriittisyys otettu huomioon X-kertoimen avulla. X-kerroin on vikamekanismin todennäköisyys ja siis jokin luku nollan ja ykkösen välillä. Luvulla kerrotaan kaavan 3.1 komponentin vikataajuus, jolloin saadaan kriittisen vikamekanismin vikataajuus. X-kertoimen m  rittelys  on käytetty apuna viitteen /16, s.7-108/ taulukkoa, jossa komponenttien vikaantumistodennäköisyydet on arvioitu prosentuaalisesti. Arvioimalla mikä tai mitkä komponentin vikamekanismeista ovat kriittisiä toiminnan kannalta, X-kerroin saadaan laskemalla näiden todennäköisyyksien summa.

Esimerkiksi yhden suodatuskondensaattorin hajoaminen katkeamalla katsottiin olevan ei-kriittinen vika, jonka voi jättää huomioimatta. Myös vastusarvon muuttuminen spesifoidusta määriteltiin ei-kriittiseksi viaksi. Viitteen /16, s.7-110/ mukaan metallikalvovastuksen viat koostuvat katkeamisista (80%) sekä vastusarvon muutoksista (20%). Näin saadaan X-kertoimen arvoksi 0.8, mikäli vastusarvon muuttumista ei lueta kriittiseksi viaksi.

4. Keskusyksikkö (CPU)

4.1 Vaatimukset

Keskusyksikköä valittaessa pääpaino asetettiin seuraaville ominaisuuksille: Sen tuli olla CMOS-tekniikkaan perustuva, jotta virrankulutus saadaan pysymään mahdollisimman pieneenä. Ohjelmamuistin (EPROM) ja luku-kirjoitumuistin (RAM) tuli sijaita piirin sisällä, jotta säästetään tilaa ja parannetaan luotettavuutta. Piirin piti sisältää mahdollisimman paljon ohjelmoitavia tulo-lähtöportteja sekä piirin valmistajalta täytyi saada testeihin perustuva vikataajuuslukema luotettavuuslaskelmaa varten.

Lisäksi toivottavia ominaisuuksia olivat sisäänrakennettu HDLC-käytännöllä toimiva asynkroninen sarjaväylä ja A/D-muunnin. Mainitut vaatimukset johtavat vääjäämättä valitsemaan markkinoilla olevista mikrokontrollereiksi kutsutavista CPU-piireistä sopivimman. Intelin 8031-perheen 8-bittisten mikrokontrollereiden saatavuus ja ominaisuudet olivat parhaiten tasapainossa ja valinnan kohteeksi tuli lopulta 87C51-prosessori /17/, josta tosin puuttuu HDLC-sarjaväylä, ja A/D-muunnin, mutta täyttää kohtuullisesti muut vaatimukset. Intelin 8744-piiri olisi ollut vielä parempi, mutta sitä ei ollut saatavana CMOS-versiona. Sisäisen RAM:n pienuus aiheutti huolta piiriä valitessa ja kuten myös itse ohjelmankehityksessä. Luku-kirjoitusmuistin laajentamiseksi käytettiin joidenkin parametrien tallentamista parametrimuistiin (EEPROM), josta kerrotaan ennemmän kappaleessa 12. Intelin 16-bittisten mikrokontrollereiden saatavuus oli heikko ja muiden valmistajien mikrokontrollereista ei projektiryhmällä ollut suurta kokemusta, joten ne karsittiin osin tästä syystä. Lisäksi markkinoille oli tulossa uusia piirejä, jotka täyttivät kaikki vaatimukset, mutta niiden saatavuus oli työtä tehdessä heikko.

CPU sisältää kaikkiaan 4 kahdeksan bitin ohjelmoitavaa tulo-lähtöporttia, joita voidaan ohjelmoida tavu- tai bittikohtaisesti. Jotkin porteista sisältävät erikoisominaisuuksia kuten sisäänrakennettu asynkroninen sarjaväylä sekä keskeytys- ja ajastinnastat. Bittikohtainen ohjelmoitavuus on välttämätön apu suunniteltaessa työssä käytettyjä sarjamuotoisesti liikennöiviä erillisiä väyliä.

4.2 Väylät

CPU:n porteista on muodostettu viisi erillistä sarjamuotoisesti liikennöivää väylää, jotka on nimetty kuvassa 2.2: MBUS, DBUS, EBUS, ABUS ja PCBUS. Oheiset taulukot 4.1-4.5 kertovat väylien signaalit ja niiden käyttötarkoituksen. Kirjaimet L ja T kertovat signaalin olevan CPU:n kannalta lähtö tai tulo. Väylien tarkoitus on mahdollistaa tiedon siirto CPU:n ja oheispiirien välillä.

MBUS-väylää käytetään CPU:n ja modeemin väliseen asynkroniseen sanomaliikenteeseen sekä valinnaisesti modeemien synkronisesti tapahtuvaan ohjelmointiin. Väylä haarautuu LCA-piirin kautta kahteen väylään, joilla saadaan näin liikennöintiyhteys valinnaisesti jompaan kumpaan modeemiin. LCA-piiri toimii siis tässä yhteydessä väylän kytkimenä.

MBUS		
signaali		käyttötarkoitus
MRxD	T	tuleva data (sanomaliikenne/ohjelmointi)
MTxD	L	lähtevä data (— , , —)
MCLK	L	kellotahdistus (modeemin ohjelmointi)
MR/W	L	luku/kirjoitus (modeemin ohjelmointi)
MEN	L	ohjelmoinnin/sanomaliikenteen valinta
MLSCT	L	modeemipiirin valinta

Taulukko 4.1 MBUS-väylän signaalit

DBUS-väylän avulla luetaan ja kirjoitetaan digitaalisia lähtöjä ja tuloja. Tiedon väliaikaiseen tallentamiseen käytetään LCA-piirille ohjelmoitua siirtorekisteriä, joka toimii samalla rinnakkais-sarja- sekä sarja-rinnakkaismuuntimena.

DBUS		
signaali		käyttötarkoitus
DRxD	T	tuleva data (digitaaliset tulot)
DTxD	L	lähtevä data (digitaaliset lähdöt)
DCLK	L	kellotahdistus
DR/W	L	luku/kirjoitus
DEN	L	väylän aktivointi (mahdollistaa siirron)

Taulukko 4.2 DBUS-väylän signaalit

EBUS-väylä on liitetty parametrimuistiin, joka säilyttää muistinsa sähkökatkoksen aikana mutta sallii myös kirjoittamisen. Lähtevässä datassa kulkee sekä kirjoitettava data että sen muistiosoite.

EBUS		
signaali	käyttötarkoitus	
EDATA T/L	tuleva/lähtevä data(osoite)	
ECLK L	kellotahdistus	

Taulukko 4.3 EBUS-väylän signaalit

ABUS-väylän avulla luetaan A/D-muuntimen kanavia. Kanavan multipleksauksessa tarvitaan myös lähtevää dataa kertomaan luettavan kanavan numeroa.

ABUS		
signaali	käyttötarkoitus	
ARxD T	tuleva data (analogiset tulot)	
ATxD L	lähtevä data (kanavan valintatieto)	
ACLK L	kellotahdistus	
AEN L	väylän aktivointi (mahdollistaa siirron)	

Taulukko 4.4 ABUS-väylän signaalit

PCBUS on välttämätön valvontayksikössä, mikäli se halutaan liittää tietokoneen sarjaliikenneporttiin. Tämän väylän kautta voidaan totetuttaa koko ohjausjärjestelmän ylätason ohjaus. Väylän asynkroninen toiminta täytyy toteuttaa ohjelmallisesti, koska CPU:lla ei ole toista MBUS:n kal-

taista sisäänrakennettu asynkronista sarjaporttia. Koejärjestelmässä PCBUS:ia käytettiin myös sanomaliikenteen ko-keiluun siten, että kaikki ohjausyksikön sanomat lähetettiin PCBUS-portin kautta siihen kytkettyyn sarjaliikenneanalysaattoriin.

PCBUS		
signaali	käyttötarkoitus	
PCRxD L	tuleva data	
PCTxD T	lähtevä data	

Taulukko 4.5 PCBUS-väylän signaalit

Lisäksi tarvitaan ohjaussignaaleja hoitamaan akkua, hätäpysäytystä, modeemipuskurien valintaa ja alkuasetuksia. Oheisessa taulukossa on kaikki CPU:n erilliset ohjaussignaalit, jotka eivät varsinaisesti kuulu mihinkään väylään.

muut ohjaussignaalit		
signaali	käyttötarkoitus	
WDO T	kylmäkäynnistys/kuumakäynnistys (vahtik.)	
WDI L	vahtikoiran "ruokinta"	
SESD L	hätäpysäytyksen asetus	
CLESD L	hätäpysäytyksen poisto	
LOAD0(1) L	lataa akku 0 (1)	
AEN0(1) L	pura akkua 0 (1)	
SLCT0-3 L	modeemipuskurien valinta	
DONE/P T/L	LCA-piiri alustettu/alusta LCA-piiri	

Taulukko 4.6 Muut CPU:n ohjaussignaalit

Tuloja ja lähtöjä tarvitaan siis kaikkiaan 32 kpl, joten CPU:n kaikki portit ovat käytössä. Muita tarvittavia signaaleja ovat RST-tulo CPU:n alkuasetukseen ja CLK0-tulo CPU:n kellosignaali. Tulot ja lähdöt voidaan jakaa CPU:n portteihin mielivaltaisesti - MTXD ja MRXD tulee kuitenkin sijoittaa nastoihin P2.0 ja P2.1.

On luonnollista, että ohjelmiston rakenne kärsii, kun laitteiston väylärakenne on edellä kuvatun kaltainen. CPU:n käskykanta on suunniteltu normaalia rinnakkaismuotoista tiedon siirtoa ja osoitusta varten, joten ohjelmiston luotettavuus huononee lisääntyneen ohjelmakoodin vuoksi. Väylien sanomaliikenteen ajoituksen tarkka määrittely ajoituskaavioiden avulla sekä testaus logiikka-analysaattorilla oli välttämätöntä, jotta luotettavaan toimintaan päästiin. Ohjelmistolta vaaditut joustavan tuotantojärjestelmän ominaisuudet kuormittivat CPU:n kapasiteettia, jonka ylärajoilla jouduttiin toimimaan. Tämä oli myös omiaan heikentämään ohjelmiston luotettavuutta.

5. Modeemi

5.1 Vaatimukset

Modeemia suunniteltaessa oli pääasiallisina vaatimuksina: CMOS-tekniikan takaama pieni virrankulutus, suuri dynamiikka kantoaallon tason vaihteluille, pieni bittivirhesuhde liikennöinnissä ja pieni koko. Sanomaliikenteen nopeuden tuli yltää ainakin 1200 bps:iin, jotta vasteaikavaatimus (20 s.) täyttyisi. Lisäksi piiristä tuli olla saatavissa valmistajan ilmoittama vikataajuus. Koska modeemia ei ollut tarkoitus käyttää puhelinverkossa, muut standardiominaisuudet eivät olleet työn kannalta tärkeitä.

Valinta kohdistui luonnollisesti yhden sirun modeemipiireihin, joita on markkinoille ilmestynyt vasta muutamia. Sanomaliikenteen nopeusvaatimus johti siihen, että kantoaallon moduloinniksi oli valittava PSK-menetelmä (Phase Shift Keying), koska FSK-menetelmällä (Frequency Shift Keying) yhden sirun modeemeilla ylletään normaalisti vain 300 bps:iin. Parhaiten vaatimukset täytti Silicon Systemsin K222L-piiri /18/, joka toimii poikkeuksellisesti pelkällä viiden voltin käyttöjännitteellä. Kantoaallon dynamiikka-alue siedettävän siirtovirheen puitteissa oli peräti 45 dB kantoaallon tason ollessa 0 ja -45 dBmO:n välillä. (Piiri on suunniteltu täyttämään CCITT:n V.22-standardin vaatimukset puhelinverkon tason vaihteluille.) K222L-piiri oli datakirjan mukaan saatavissa myös versiona, jossa sen ohjelmointi tapahtuu sarjamuotoisen väylän kautta. Tämä olisi sopinut työn tarpeisiin vallan loistavasti - vahinko vain, että kyseistä piiriä ei ollut markkinoilla. Tämän johdosta modeemin ohjelmointi suoritetaan LCA-piiriin ohjelmoidun tavallaan turhan sarja-rinnakkaismuuntimen avulla, koska käytetty piirityyppi ohjelmoidaan rinnakkaismuotoisesti.

5.2 Modeemien välinen liikennöinti

Modeemi on ohjelmoitavissa kahteen tilaan: perustilaan (originate mode) ja vastaustilaan (answer mode). Näitä vastaavat kantoaaltotaajuuudet 1200Hz ja 2400Hz. Modeemit alustetaan kylmä- tai kuumakäynnistyksessä RST-signaalin avulla niin, että ne asettuvat automaattisesti perustilaan. Tässä tilassa modeemi on valmis lähettämään välittömästi sarjaliikenneporttiin tulevan datan eteenpäin ja samanaikaisesti (full duplex) ottamaan vastaan vastaustilaan ohjelmoidulta modeemilta. Jotta tiedonsiirto ohjausyksikön ja valvontayksikön välillä toimisi, toisen modeemin on oltava perustilassa ja toisen vastaustilassa. Mikäli järjestelmään on kytketty muita modeemeja, ne on ohjelmoitava kuuntelulle kantoaallon lähetys pois kytkettynä, jotta niiden kantoaallot eivät sotkisi lähettävän modeemin kantoaaltoa.

Toinen tapa on käyttää vain yhtä kantoaaltotaajuuutta ja vuorosuntaista sanomaliikennettä (half duplex). Tällöin kuunteleva modeemin kantoaalto kytketään pois ja pelkästään lähettävän modeemin kantoaalto näkyy linjalla. Tätä menetelmää jouduttiin käyttämään koejärjestelmässä, koska kuuntelevan modeemin oma kantoaalto modeemipuskurissa vahvistettuna sotki vastaanoton ja näin full duplex-yhteyttä ei saatu aikaiseksi kuin lyhyillä vähän vahvistusta vaativilla etäisyyksillä. Ongelman periaatteellien ratkaisu olisi ollut summata vastaanotettuun signaaliin invertoitu lähetysignaali, jolloin vastaanotossa näkyisi pelkästään kaapelin toisessa päässä olevan modeemin kantoaalto. Tällainen tekninen ratkaisu on kuitenkin monimutkainen eikä työn kannalta aivan välttämätön.

5.3 Modeemin ohjelmointi

Modeemipiiri sisältää kaksi kahdeksan bitin ohjausrekisteriä, joihin kirjoittamalla keskusyksikkö voi ohjata modeemin toimintaa. Vain ensimmäinen kahdesta ohjausrekisteristä sisältää työssä tarvittavia toimintoja, toinen sisältää lähinnä puheliyhteydessä tarvittavia ohjauksia. Käytössä olevat rekisterin bittikuviot ja niitä vastaavat toiminnot on esitetty taulukossa 5.1. Tästä huomataan, että mikäli käytetään 1200bps:n asynkronista liikennöintiä, on tarpeellista kyetä ohjelmoimaan ainoastaan rekisterin kahta viimeistä bittiä.

Piirissä on myös kolme tilarekisteriä, joita lukemalla keskusyksikkö voi tutkia modeemipiirin tiloja. Lukeminen ei kuitenkaan työssä katsottu tarpeelliseksi ominaisuudeksi ja on jätetty sen tähden pois.

7	6	5	4	3	2	1	0
modul. option	—	TXD mode 3	TXD mode 2	TXD mode 1	TXD mode 0	TXD enable	orig./ answer

7:	0 = 1200 BPS DPSK
6:	0 = ei merkitystä
5-2:	0110 = Asynkroninen lähetys, 10 bittiä/merkki
1:	0 = kantoaalto pois päältä 1 = kantoaalto päällä
0:	0 = vastaustila (lähetys 2400 Hz:n kantoaalto) 1 = perustila (lähetys 1200 Hz:n kantoaalto)

Taulukko 5.1 Modeemipiirin rekisteri 0
(osoite 000)

5.4 Väylät

Modeemi A liittyy muuhun laitteistoon kolmen väylän avulla, jotka on nimetty kuvassa 2.2: MBUSA, MCTLA ja ABUSA. (Vastaavasti modeemi B:n väylät MBUSB, MCTLB ja ABUSB.) Oheiset taulukot 5.2-5.3 kertovat väylien signaalit ja niiden käyttötarkoituksen. Kirjaimet L ja T kertovat signaalin olevan modeemin kannalta lähtö tai tulo.

MBUSA-väylää käytetään CPU:n ja modeemin väliseen asynkroniseen sanomaliikenteeseen. Se kytkeytyy LCA-piirin sisällä MBUS-väylään (vrt. kohta 4.2) kytkimen avulla, jota MSLCT-signaali ohjaa. Erona MBUS-väylään on se, että modeemin ohjelmointiin liittyvä data ei näy MBUSA-väylässä kytkimen ollessa ohjelmoinnin aikana auki.

MBUSA		
signaali		käyttötarkoitus
MRxD	L	kantoallosta vastaan otettu data
MTxD	T	kantoaallolla lähetettävä data

Taulukko 5.2 MBUSA-väylän signaalit

MCTLA-väylä sisältää modeemin ohjelmoinnissa tarvittavan rinnakkaismuotoisen osoite- dataväylän. Väylä kytkeytyy LCA-piiriin, jossa tarvittava sarja-rinnakkaismuunnos tapahtuu.

MCTLA		
signaali		käyttötarkoitus
AD0-7	T	osoite- ja datasignaalit
ALE	T	osoite aktiivinen
RD	T	lukutoiminto
WR	T	kirjoitustoiminto
CS	T	piirin ohjelmoinnin aktivoiti

Taulukko 5.3 MCTLA-väylän signaalit

ABUSA-väylä on vastaanotetulle ja lähetetylle kantoaallolle varattu väylä, joka yhdistää modeemin ja modeemipuskurin niiden välissä olevan kytkimen avulla. Lähtevän kantoaallon taso on -10dBm0 tasajännitetason ollessa 2.5V. Tulevan kantoaallon taso saa vaihdella 0:n ja -45 dBm0:n välillä.

ABUSA		
signaali		käyttötarkoitus
TxA	L	vastaanotettu kantoaalto
RxA	T	lähetetty kantoaalto

Taulukko 5.4 ABUSA-väylän signaalit

5.5 Modeemin ja CPU:n välinen liikennöinti

Modeemipiirien ohjelmoinnista vastaa keskusyksikkö. Sen MBUS-väylää käytetään paitsi sanomanvälitykseen modeemien välillä myös modeemien ohjelmointiin. Näin saadaan kaksi

merkittävää etu: säästetään keskusyksikön I/O-nastoja sekä parannetaan luotettavuutta. Koska luotettavuuden kannalta on olennaisen tärkeää, että juuri keskusyksikön asynkroninen sarjaportti toimii, kannattaa sitä siis käyttää mahdollisimman moneen eri toimintaan (kuten tässä modeemien ohjelmointiin, koska sanomaliikenne ja ohjelmointi ei tapahdu koskaan samanaikaisesti). Koska modeemien data-, osoite- ja ohjausväylä on rinnakkaismuotoinen, keskusyksikön ja modeemien välillä tarvitaan sarja-rinnakkaismuunnin. Tämä muunnin on ohjelmoitu LCA-piirin sisälle. Sen tehtävänä on muuttaa keskusyksiköltä tuleva sarjamuotoinen osoitetieto ja ohjausrekisteritieto modeemipiirin ymmärtämään rinnakkaiseen muotoon ja ohjata modeemipiirin ohjauslinjoja ALE, WR, RD ja CS.

Keskusyksikkö ilmaisee MEN-linjan (Modem Enable) avulla sen, halutaanko ohjelmoida modeemi vai onko kyseessä normaali sanomaliikenneyhteys modeemin ja keskusyksikön välillä. MSLCT-linjalla valitaan kumpi kahdesta modeemista on käytössä. Oheinen taulukko 5.5 esittää edellämainittujen linjojen tasoja vastaavat toiminnot.

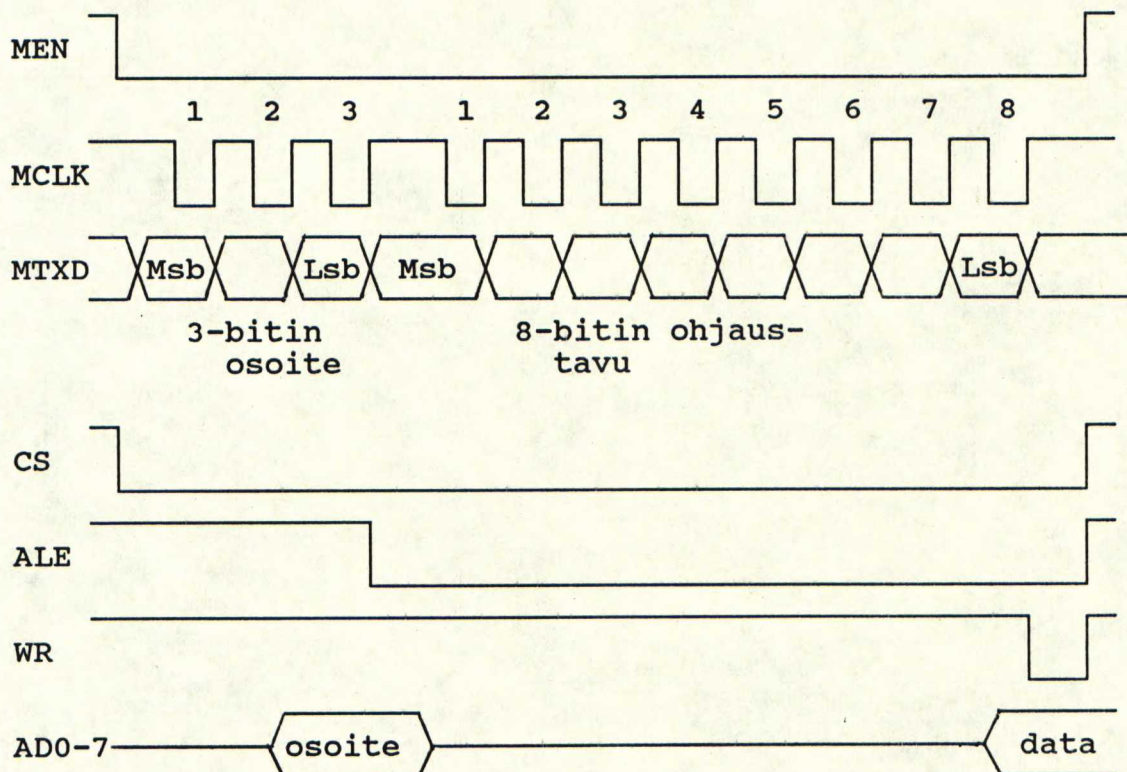
MEN	MSLCT	TOIMINTO
0	0	ohjelmoidaan modeemi A
0	1	ohjelmoidaan modeemi B
1	0	liikennöinti; modeemi A
1	1	liikennöinti; modeemi B

Taulukko 5.5 Modeemin valintasihtaalit

Modeemin ohjausrekisterin osoite ja siihen ohjelmoitava data siirtyy MTXD-linjaa pitkin MCLK-linjan tahdistamana

sarjamuotoisesti LCA-piirin siirtorekisteriin, josta ne siirron lopuksi liipaistaan ALE- ja WR-linjojen avulla rinnakaismuotoisena modeemien tuloihin.

Signaali-kaavio keskusyksikön, modeemin ja LCA-piirin välisestä liikennöinnistä on esitetty kuvassa 5.1.



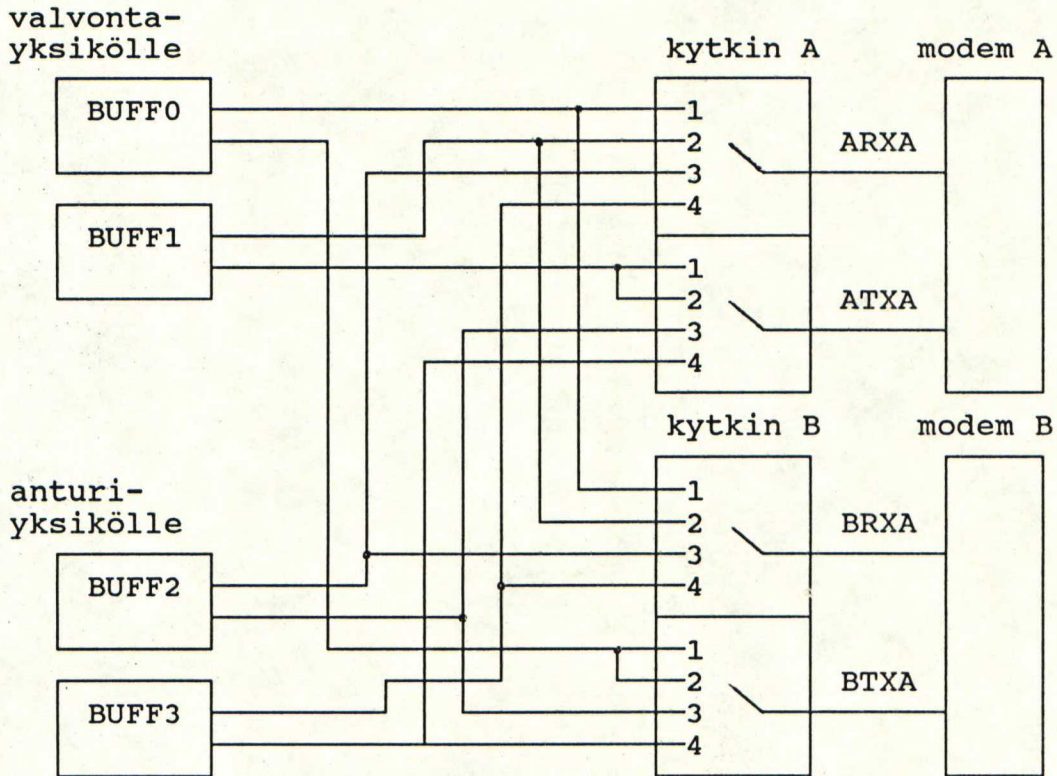
Kuva 5.1 Modeemin ohjelmointi

5.6 Linjakytkimien valinta

Modeemin kantoaalto voidaan ohjata kulkemaan kytkimen avulla johonkin neljästä modeemipuskurista.

Kuvassa 5.2 on esitetty kytkimien toimintaperiaate. Kytkimien asento valitaan keskusyksikön lähdöillä SLCT0 ja SLCT1, joiden tilakaavio on esitetty taulukossa 5.6.

BUFF0-3 kuvaavat neljää käytössä olevaa modeemipuskuria. Modem A ja modem B kuvaavat käytössä olevia kahta modeemi-piiriä, joista vain yhtä käytetään kerrallaan. Tämä valinta tehdään keskusyksikön lähdöillä SLCT2 ja SLCT3, joiden tilakaavio on esitetty taulukossa 5.7.



Kuva 5.2 Kytkimien toimintaperiaate

SLCT1	SLCT0	kytkin A asento	kytkin B asento
0	0	1	1
0	1	2	2
1	0	3	3
1	1	4	4

Taulukko 5.6 Kytkimien valintasignaalit

SLCT3	SLCT2	kytkin A asento	kytkin B asento
0	0	kielletty tila	
0	1	kiinni	auki
1	0	auki	kiinni
1	1	auki	auki

Taulukko 5.7 Kytkimien tilat

5.7 Modeemipuskuri

Modeemipuskurin tehtävänä on vahvistaa lähtevä kantaalto riittävän suureksi, jotta vastaanotossa sen taso on > -45 dBmO:ia. Tyypillinen kaapelin vaimennus on 0.7 - 1 dB/km, lisäksi tulee huomioida kaapeliin kytkettyjen linjamuuntajien aiheuttama vaimennus. Koejärjestelmässä vahvistus säädettiin 20 dB:ksi, joten lähtevän signaalin taso oli 10 dBmO:ia. Kytkennässä käytettiin lähteen /18, s.18/ tapaa sillä lisäyksellä, että lähettimen perään kytkettiin tehooperaatiovahvistin LT1010 riittävän tason saamiseksi verrattaen alhaiseen impedanssisovitukseen. Käytetyn kaapelin ominaisimpedanssi oli 150 ohmia 1200 Hz: taajuudella. Kytkennästä on jätetty pois kaikki puhelinyhteyden aikaansaamiseksi tarvittava laitteisto.

6. Analogia-digitaalimuunnin

6.1 Vaatimukset

Analogia-digitaalimuunninista suunnitellessa tärkeimpiä valintakriteereitä olivat: 8-bitin resoluutio, sarjamuotoinen liitäntä CPU:hun, sekä mahdollisimman monta multipleksattua analogiakanavaa.

Kaksi viimeistä ominaisuutta samassa piirissä aiheutti ongelmia piiriä valitessa. Texasin CMOS-tekniikalla toteutettu tavallinen TLC541 toteuttaa vaatimukset ja sitä valmistaa myös National Semiconductors. Piirissä on kaikkiaan 12 multipleksattua kanavaa, joista yksi on varattu piirin sisäiseen testaukseen. Luotettavuustietoja ei ole saatavana kyseisestä piiristä, mutta komponenttikirjoista löytyy vikataajuuksia kyseisten valmistajien CMOS-prosesseista, joita käytettiin hyväksi luotettavuuslaskelmassa.

6.2 Analogiatulojen mittaus

Analogia-digitaalimuuntimen vertailujännitteenä käytetään 2.4 V:n jännitettä, joka vastaa maksimiarvoa tuloissa. Vertailujännite on tehty yleisen AD580-piirin ja vastusjaon avulla. Vastusjakoa jouduttiin käyttämään koska muuten 20mA:n virran jännitteeksi muuttavan vastusverkon vastusarvoista ei löytynyt sopivaa 125 ohmin arvoa vaan lähin sopiva oli 120 ohmia. Mikäli mittausaluetta halutaan laajentaa, voidaan referenssijännitteeksi sovittaa AD581-piirillä ja sopivalla vastusjaolla jokin alle viiden voltin jännite. AD581-piirin suurempaa käyttöjännitettä varten kortilla on kytkin, jolla valitaan joko viiden tai 24 voltin käyttöjännite.

Kortille on kytketty yhteensä 11 analogiatuloa, joita A/D-muunnin mittaa. Kortin ulkopuolelta tulevilla antureilla on varattu 7 kanavaa (kanavat 1-7), loput 4 vapaata kanavaa on varattu kortin sisäisiin mittauksiin.

Akkujen jännitteet saadaan kanavilta 8 ja 9. Jännite voidaan mitata kyseiseltä akulta vain silloin, kun sen latausta samanaikaisesti puretaan. Akun latauksen purkamisesta on kerrottu akkujen käyttöä koskevassa kappaleessa. A/D-muuntimelta saatu jännitearvo on kerrottava lukemalla 11 ja vähentämällä lopputuloksesta 0.7 voltia, jotta saataisiin akun todellinen napajännite. Tämä johtuu akun napajännitteen muuttamisesta sopivalla vastusjaolla A/D-muuntimen dynamiikka-alueelle sekä mittausvirtapiirissä yhden myötasuuntaisen diodin ylitse kuluvan jännitehäviön takia.

Ohjattavien toimilaitteiden syöttöjännitteen (SPOW) taso ennen ja jälkeen virranrajoituksen saadaan kanavilta 11 ja 10. Mittauksen tuloksena saatu jännitearvo kerrotaan luvulla 17.53, jonka tuloksena saadaan todellinen jännite. Tämä laskutoimitus johtuu mitattavan jännitteen jakamisesta vastusjaolla A/D-muuntimen dynamiikan alueelle.

Virranrajoituksen alkaessa toimia, kanavien 10 ja 11 välinen ero alkaa kasvaa, mitä tietoa voidaan tarvittaessa käyttää hälytystietona tai sen avulla voidaan arvioida toimilaitteiden kuluttaman virran suuruutta.

Yksi ylimääräinen kanava (kanava 12) on A/D-muuntimen sisäinen ja se on tarkoitettu piirin testaukseen. Tältä kanavalta saatu lukema saa vaihdella heksadesimaalilukujen 7D ja 83 välillä. Mikäli lukema ei ole tällä välillä, A/D-muuntimessa on jotain vikaa.

Taulukossa 6.1 on esitetty käytössä olevat kanavat.

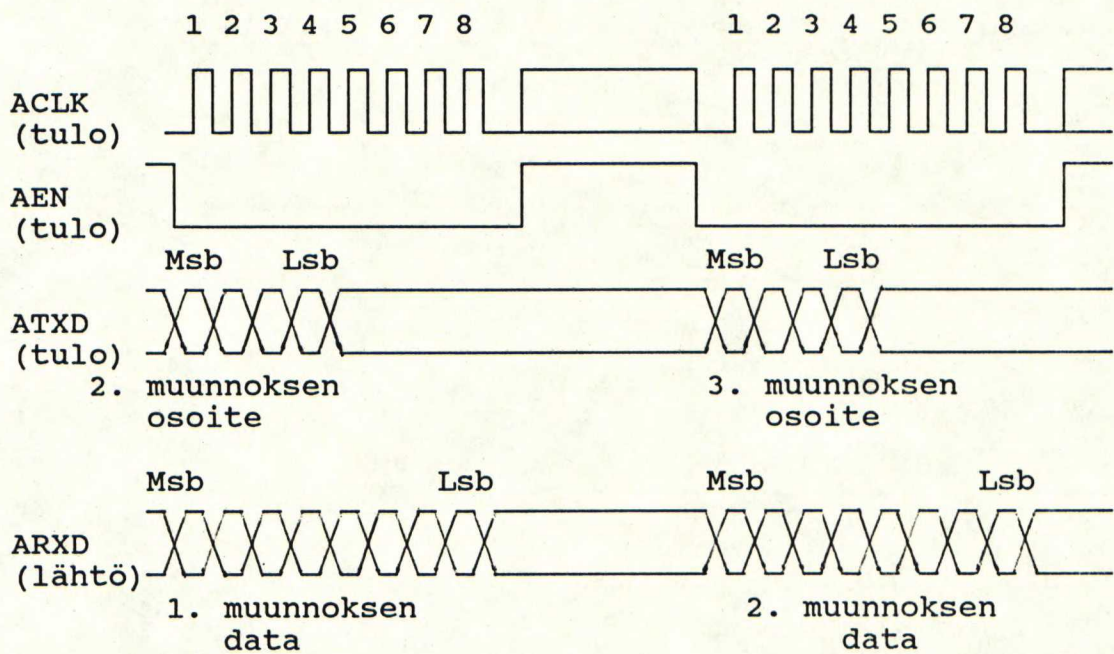
kanava	nimi	käyttötarkoitus
1-7	AIN0-6	4-20 mA:n virtaviestiantureille
8	AIN7	akun 1 jännitemittaus
9	AIN8	akun 2 jännitemittaus
10	AIN9	toimilaitt. syöttöjänn. mittaus
11	AIN10	toimilaitt. syöttöjänn. mittaus
12	AIN11	A/D-muuntimen sisäinen tila

Taulukko 6.1 A/D-muuntimen kanavat

6.3 A/D-muuntimen liikennöinti

A/D-muuntimen 12 kanavaa voidaan lukea käyttäen sarjamuotoista liikennöintiä keskusyksikön ja A/D-muuntimen välillä. Liikennöinti tapahtuu ABUS-väylää pitkin, josta on kerrottu kohdassa 5.2. Muunnin lisäksi tarvitsee kellosignaalin (SYSCLK) varsinaisen analogia-digitaalimuunnoksen suorittamiseen kaikilla kanavilla. Tämä kellosignaali on johdotettu LCA-piiriltä ja taajuus on saatu jakamalla LCA-piirin sisälle ohjelmoidulla jakajalla 11.0592 MHz:n perustaajuus 16:lla. Näin saatu taajuus on 691.12 kHz.

Liikennöinnin periaate on esitetty kuvassa 6.3.

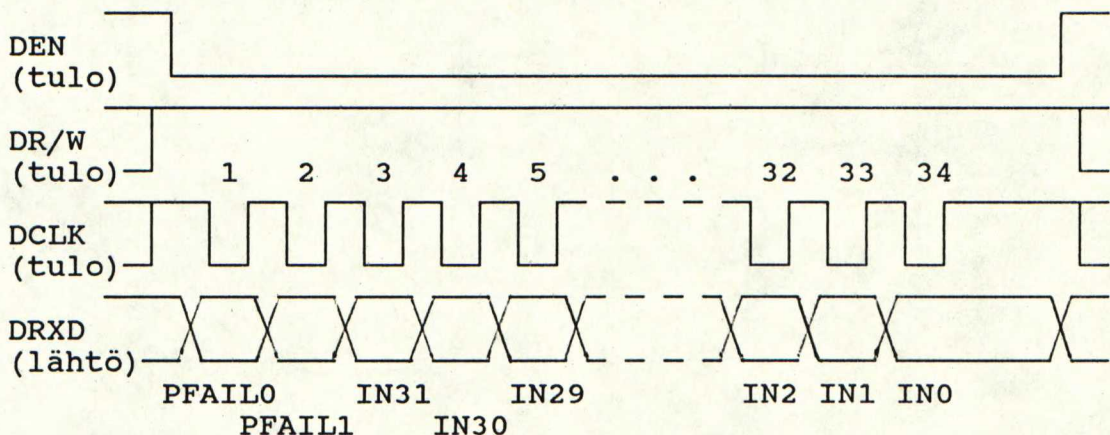


Kuva 6.3 A/D-muuntimen liikennöinti

7. Digitaalitulot

Digitaalitulojen tuli olla liittävässä 24 V:n kytkintietoihin, joiden lukumäärä alunperin määriteltiin 16:ksi. Koska haluttiin parantaa tulojen luotettavuutta, lukumäärä kaksinkertaistettiin, jolloin kytkintieto on kytkettävissä kahteen tulonapaan.

Kytkintiedon 24 V:n taso on skaalattu viiden voltin tasoon 4.7 V zenerdiodin ja sarjavastuksen avulla. Näin suojaudutaan samalla mahdollisilta ylijännitteiltä. Digitaalituloja luetaan LCA-piirin kautta sarjamuotoista liikennöintiä hyväksi käyttäen. Liikennöinti tapahtuu DBUS-väylää pitkin, jonka kuvaus on kerrottu kohdassa 4.2. LCA siirtää tulot siirtorekisteriinsä, jota kellottamalla data siirtyy sarjalinjaa myöten keskusyksikön luettavaksi. LCA-piiri toimii siis rinnan-sarjamuuntimena digitaalituloja luettaessa. Kaikkiaan 34 tulosta 32 kpl on kortin ulkopuolelta tulevia kytkintietoja, loput kaksi (PFAIL0 ja PFAIL1) kertovat pääsyöttöjännitteen katkeamisesta ja ovat siis sisäistä informaatiota. Tästä ominaisuudesta on kerrottu lähemmin akkuja käsittelevässä kappaleessa.



Kuva 7.1 Digitaalitulojen lukusekvenssi; LCA-piiri

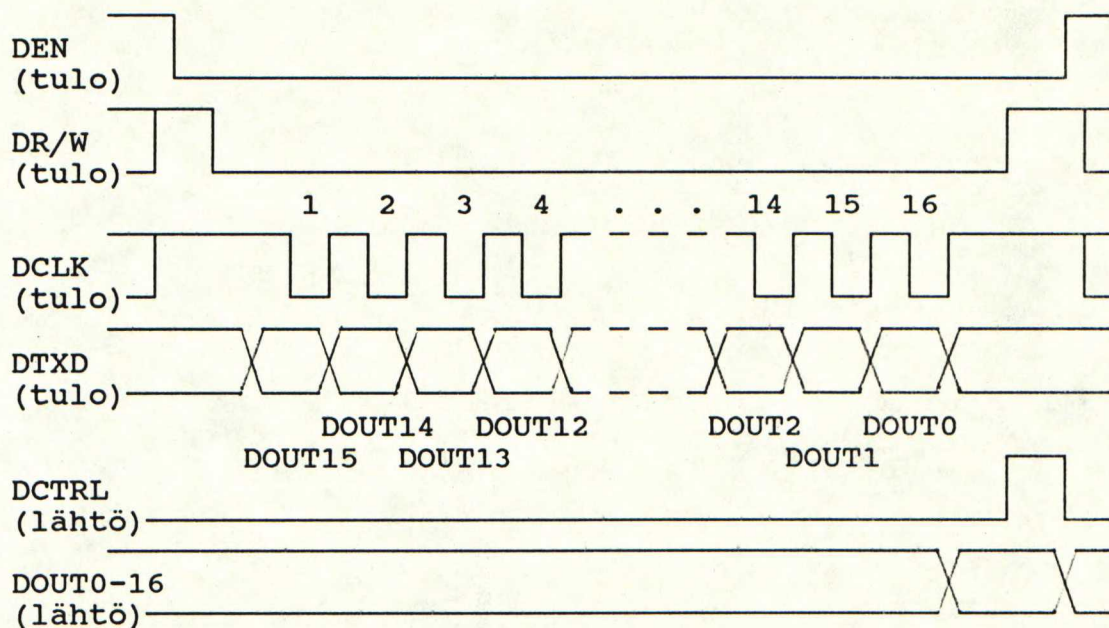
8. Digitaalilähdöt

Digitaalilähdöillä tuli kyetä ohjaamaan laitteistoon liitettäviä toimilaitteita, kuten paineilma- ja hydraulikkaventtiileitä. Vaatimuksena oli 24 V:n lähtötaso ja vähintään 0.5 A:n virransyöttökyky lähtöä kohden, joita tuli olla 60 kpl. Lisäksi vaatimuksena oli, että vain neljä lähtöä sai olla yhtäaikaa päällä, jotta tehonsyöttöä ei kuormitettaisi liikaa.

Digitaalilähdön toteutus tapahtui dekodeamalla 16 bitin sarja-rinnanmuuntimen sisältö 4*4 bitin ryhmissä kaikkiaan 64 lähdöksi, jolloin siis vain neljää lähtöä voidaan ohjata kerrallaan. Jokaisen neljän ryhmän viimeinen 16. lähtö on jätetty kytkemättä. Ohjaamalla tämä lähtö aktiiviseksi saadaan kaikki todelliset lähdöt ohjattua pois päältä.

Myös digitaalilähtöjen ohjaaminen tapahtuu LCA-piirin välityksellä ja samaa väylää ja siirtorekisteriä käyttäen kuin tulojakin luettaessa. Keskusyksikkö kellottaa digitaalilähdöt LCA-piirin siirtorekisteriin, josta ne liipaisuavat kellotuksen päättyessä piirin lähtöihin. Tällöin LCA-piiri toimii sarja-rinnanmuuntimena, jolla on 16 lähtönappia.

Digitaalilähdöt on suunniteltu siten, että LCA-piiriltä on johdotettu kaikki 16 lähtöä (sekä ESD-transistoria ohjaava lähtö) DFU-kortille, jossa sijaitsevat toimilaitteita ohjaavat transistorit. DFU-kortilla 16 lähtöä muunnetaan 4-16-dekooderilla yhteensä 64:ksi erilliseksi linjaksi. Dekooderipiirien (74HCT4514) tarvitsema liipaisu muodostetaan LCA-piirin sisälle ohjelmoidulla 16-bitin laskurilla, joka valvoo keskusyksiköltä tulevien kellopulslien määrää. Kun 16 kellojaksoa on tapahtunut, dekodeeripiirien liipaisu tapahtuu sille varatulla lähdöllä (DCTRL). LCA-piirin liikennöinnin periaate esitetty kuvassa 8.1.



Kuva 8.1 Digitaalitulojen lukusekvenssi; LCA-piiri

LCA-piirin toimintoihin kuuluu laitteistossa myös ohjata kellosignaalit CPU:lle, modeemille, sekä A/D-muuntimelle. Näin järjestelmässä on vain yksi kvartsikide hoitamassa koko laitteiston tarvitsemia kellosignaaleja.

9. Solumatriisipiiri (LCA)

Koska piirikortin koko haluttiin saada mahdollisimman pieneksi, nousi tarve löytää mahdollisiman monipuolinen ohjelmoitava logiikkapiiri, johon kaikki tarpeellinen hajalogiikka mahtuisi. Piirin tuli olla luonnollisesti CMOS-tekniikalla prosessoitu ja sen tuli olla luotettava.

Mikään perinteinen tai hieman edityksellisempikään PLD-, EPLD tai PAL-piiri ei täyttänyt vaatimuksia vaan ainoa todellinen vaihtoehto tuntui olevan melko uusi Xilinxin LCA-piiriperhe. Perheen pienin XC2064 soveltui erinomaisesti työn kaltaisen irtologiikan integroimiseen, jossa esiintyy laskureita, siirtorekisteritä ja multipleksereitä. Lisäksi piirin luotettavuudesta oli saatavana runsaasti testiaineistoa, joka tosin oli valmistajan itsensä tekemää.

LCA (Logic Cell Array) on ohjelmoitava solumatriisipiiri, joka muodostuu ohjelmoitavien logiikkalohkojen matriisista, jonka suuruus on 8 x 8. Kussakin lohkoissa on yksi muistielementti sekä kombinaatiologiikkaa, jolla neljästä tulosta voi ohjelmoida minkä tahansa Boolean-funktion mukaisen lähdön. LCA-piirillä on kaikkiaan 56 käytettävissä olevaa tulo- tai lähtönastaa, jotka voidaan ohjelmoida tavallisen lähdön tai tulon lisäksi avokollektori- tai kolmitilalähdöksi sekä kelloitettavaksi sisääntuloksi.

Tulo/lähtönastat ja logiikkalohkot johdotetaan toisiinsa piirin sisäisillä vedoilla, joita on kolmea perustyyppiä. Ns. pitkät johdot (long lines) ovat suoria piirin päästä päähän ulottuvia etupäässä nopeille signaaleille tarkoitettuja kiinteitä vetoja. Yleisvedot (general purpose interconnect) ovat hieman hitaampia joskin monipuolisemmin yhdistettäviä johdotuksia. Lisäksi suorat vedot (direct interconnect) voidaan ohjelmoida yhdistämään vierekkäisiä

logiikkalohkoja erittäin pienellä kulkuaikaviiveellä. Yhdistyminen tapahtuu kytkentämatriisien avulla, jossa 8 vetoa voidaan melko monipuolisesti liittää toisiinsa. Kytkentämatriisiin liittyy aina 4 vaakasuoraa ja 4 pystysuoraa vetoa. Lisäksi piirillä on kaksi kellosignaalinlinjaa (global & auxiliary buffer) tahdistetussa logiikassa tarvittavia kellosignaaleja varten.

LCA-piirien ohjelmointi tapahtuu piirieditorin, automaattisen sijoitus- ja johdotusohjelman, XACT-editorin ja XPROM-ohjelman avulla. Piirieditorilla luodaan kytkentäkaavio tai looginen kuvaus piirin toiminnasta ja editoriksi kelpaavat monet markkinoilla olevista piirieditoreista. Automaattinen sijoitus- ja johdotusohjelma optimoi piirin lohkojen ja vetojen määrän ja pituuden. XACT-editorilla tehdään tarvittavat johdotusmuutokset ja luodaan XPROM-ohjelmaa varten bittitieto piirin sisällöstä. XPROM-ohjelman ja ohjelmointilaitteitteen avulla piirin toiminta tallennetaan lukumuistiin käyttöä varten.

LCA-piirin toiminnan muuttaminen vaatii aina uutta ohjelmointikierrosta sekä lukumuistipiirin vaihtoa. Itse LCA-piirejä ei tarvitse irroittaa piirilevyltä. Viiteessä /19/ on kerrottu enemmän piirin toiminnasta.

LCA-piirien käyttö onnistui yli odotusten. Suunnittelua helpotti DASH-piirieditori, jonka käyttö oli ennestään tuttua. XACT-editorin käyttö on pahimmillaan erittäin vaikeata, mikäli automaattinen sijoitus- ja johdotusohjelma jättää vetoja johdottamatta kytkennän monimutkaisuudesta johtuen. Onneksi näin ei ollut laita kahdessa suunnittelussa piirissä, joten XACT-editorin käyttö jäi vähiin.

10. Parametrimuisti

Tavanomainen tapa kertoa ohjelmistolle kortin laiteosoite ja muut käytössä tarvittavat parametrit on käyttää piirilevyllä sijaitsevia pienoiskytkimiä. Koska suunniteltavan laitteiston oletettu sijainti estää kytkimien käsin tapahtuvan kääntämisen, vaatimuksena oli löytää korvaava menetelmä.

Laitteistoon lisättiin sarjamuotoisesti liikennöivä EEPROM pitämään sisällään parametritietoja laitteiston kokoonpanosta. Tällaisia parametritietoja ovat laiteosoitteen lisäksi analogiatulojen hälytysrajat ja niiden kriittisyydet, kytkettyjen anturiyksiköiden lukumäärä ja niihin liitettyjen antureiden lukumäärä, hälytysrajat ja kriittisyydet.

Eepromin sisältö ohjelmoidaan ennen asennusta piirilevyllä, mutta CPU voi tarvittaessa käydä lukemassa tai kirjoittamassa sen sisältöä EBUS-väylän avulla. Tämä ominaisuus mahdollistaa joustavan tuotantojärjestelmän rakentamisen niin, että konfiguraatioita voidaan muuttaa asennuksen jälkeenkin. Tämä oli koelaitteiston kannalta tärkeää esimerkiksi, että ei voitu etukäteen määritellä, missä ohjausyksikössä tai anturiyksikössä sijaitsevat hälytysrajoja tutkivat kriittiset anturit ja mitkä ovat niiden hälytysrajat. Lisäksi parametrimuistia jouduttiin käyttämään osittain korvaamaan CPU:n pientä luku-kirjoitusmuistia. Tämä ominaisuus oli mahdollista lisätä sen hitaudesta huolimatta, koska koejärjestelmään kytkettyjä ohjausyksiköitä kysellään valvontayksiköstä vuoronperään, jolloin suurimman osan ajasta ohjausyksikkö on passiivinen ja aikaa esim. parametrimuistin päivittämiseen on runsaasti.

Lähteestä /20/ löytyy lisätietoja X24C04:n käyttämästä verrattain monimutkaisesta liikennöinti-protokollasta.

11. Tietokoneliitäntä

Käytettäessä laitteistoa valvontayksikkönä tarvitaan tietokoneliitäntä, jonka avulla hajautetun tuotantojärjestelmän ylätasoon ohjaus voidaan toteuttaa. Liitäntä toteutetaan yleensä CPU:n ja siihen liitettävän sarjaliikennepiirin sekä linjapuskurin avulla.

Koska piirilevyllä ei ollut tilaa käytettävissä erillistä sarjaliikennepiiriä varten, tietokoneliitäntä oli toteutettava kokonaan ohjelmallisesti CPU:n avulla. Tämä johtui siitä, että haluttiin käyttää samaa jo valmista korttia, joka oli suunniteltu ohjausyksikköä varten. Liitäntä tehtiin suoraan keskusyksikön kahden lähdön avulla liittämällä ne suoraan RS-232C-puskureihin. (ks. PCBUS, 4.2) Ohjelmallinen toteutus on mahdollinen koska valvontayksikössä ei nimestään huolimatta ole varsinaista älykkyyttä vaan sen tehtävänä on sanomaliikenteen hoitaminen valvomona toimivan tietokoneen ja ohjausyksiköiden välillä.

Tietokoneliitännän käyttämät RS-232C-puskurit on kahdennettu, joten valvomo voidaan kytkeä jompaan kumpaan RS-232C-linjaan. Koelaitteistossa liitäntää käytettiin myös ohjausyksikössä ohjelmiston testaukseen. Porttiin liitettiin sarjaliikenneanalyysiaattori, jonka avulla voitiin tutkia sanomaliikennettä, kun CPU:n ohjelmistossa oli rutiini, joka kirjoitti tietokoneliitännään kaikki modeemin kautta kulkevat sanomat.

12. Teholähde

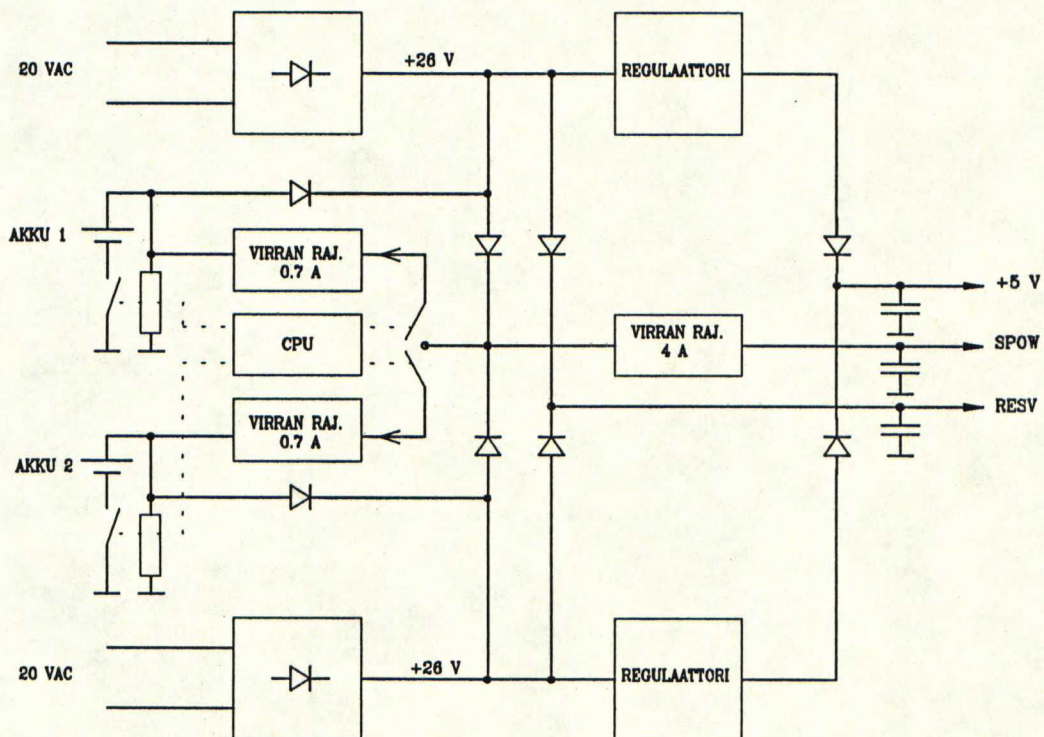
Teholähteen tulojännitteeksi oli määritelty erikoinen 20 V AC/385Hz ja lähtöjännitteiden tuli olla a) 5V digitaalipiireille b) n. 24 V piirikortin analogiapiireille, toimilaitteiden ohjaamiseen sekä akun lataukseen. Teholähteen tuli lisäksi rajoittaa laitteen maksimiteho 100 wattiin, joka syntyy pääosin toimilaitteiden ohjauksessa kuluvaan tehota. Luotettavuuden lisäämiseksi teholähteen kahdennus oli myös tarpeen.

Teholähteeksi suunniteltiin lineaarinen oikosulku- ja ylijännitesuojattu virtalähde, jonka periaate on esitetty kuvassa 12.1. Vaikka hakkuripohjainen teholähde olisikin ollut taloudellisempi, luotettavuussyistä päädyttiin kuitenkin lineaariseen teholähteeseen. Teholähteet kahdennettiin aktiivisella (active parallel redundancy) menetelmällä, jossa molemmat teholähteet ovat jatkuvasti päällä ja piirilevyn ja toimilaitteiden ottama teho jakaantuu tasaisesti diodien kautta molemmille teholähteille. Tällä tavalla kuormitusta teholähdettä kohden voidaan pienentää ja elinikää kasvattaa. Jännitelähteen tulojännite saadaan sopivan tasoisena (n. 20 V rms) suoraan liittimeltä, joten muuntajia ei tarvita.

Laitteen toimintaan tarvittiin kaksi tasajännitetasoa 26 V ja 5 V. 26 V saadaan 20 V:n vaihtojännitteestä tasasuuntaamalla ja suodattamalla. 5V joudutaan reguloimaan suoraan 26 V:sta koska muutoin akkua, jonka nimellisjännite on 24 V on vaikea sovittaa laitteistoon. Regulaattorina käytettiin säädettävää LM317-regulaattoria, jonka ulostulo valittiin vastusjaolla 5.7 volttiin. Aktiivinen kahdennus toteutettiin yksinkertaisesti kytkemällä regulaattorien lähdöt nopeiden diodien kautta yhteen. Näin todellinen käyttöjännite on diodin myötäsuuntaisen jännitehäviön jälkeen viisi volttia. Myös 26 V:n jännite on kytketty samal-

la menetelmällä tasasuuntauksen jälkeen diodien kautta yhteen. 26V:n jännitetaso on jaettu kahteen osaan, joista RESV on piirilevyn mikropiirien tarvitsema jännite ja SPOW toimilaitteiden tehonsyöttöön tarkoitettu jännite. Näin taataan piirilevyn mikropiirien tarvitseman jännitteen tasainen syöttö huolimatta muuttuvasta kuormituksesta toimilaitteita ohjattaessa.

Tehonrajoitus suunniteltiin niin, että ohjattavien toimilaitteiden syöttövirta rajoitettiin 4 A:iin. Virranrajoituksen takia toimilaitteiden syöttöjännite alenee kuormituksen lisääntyessä. Neljän ampeerin virralla jännite on laskenut n. 16 V:iin, joten käytännössä joudutaan tyytymään pienempään virransyöttökykyyn kuin 4 A. Kaksi ampeeria oli koelaitteistoon määritelty maksimivirta normaalikäytössä.



Kuva 12.1 Teholähde

Jännitelähteeseen lisättiin kaksi komparaattoria, jotka tutkivat käyttöjännitteiden tilaa. Komparaattoreiden lähdöt (PFAIL0, PFAIL1) on kytketty digitaalituloihin, mistä CPU voi ne tarvittaessa lukea osana digitaalisten tulojen lukusekvenssiä. Näiden kahden tulon käyttö liittyy olennaisesti akkujen käyttöön, ja tarkemmin asiasta on kerrottu seuraavassa luvussa.

Lisäksi CPU tutkii A/D-muuntimen kahta tuloa, jotka on kytketty toimilaitteiden syöttöjännitteeseen ennen ja jälkeen virranrajoituksen (vrt. analogiatulojen mittaus). Näistä tuloista CPU voi päätellä miten kauan akkujen varassa voidaan vielä turvallisesti työskennellä sekä sen miten suuri ohjausvirta toimilaitteille on kytkeytynyt. CPU:lla on mahdollisuus liian suuren kuormituksen aikana kytkeä joitakin toimilaitteohjauksia pois päältä kuormituksen alenemiseksi esim. silloin, kun toimitaan pelkästään akun varassa. Kuormituksen suuruus on verrannollinen virranrajoituksessa kuluvaan jännitehäviöön.

Virranrajoitus toteutettiin yksinkertaisella virrantunnistimella (pieni sarjavastus), joka ohjaa toimilaitteille menevää virtaa rajoittavaa transistoria. Toimilaitteiden syöttöjännitettä ei voi kuormittaa maksimivirralla (3.5 - 4A) puolta minuuttia kauempaa virtaa rajoittavien komponenttien kuumenemisen vuoksi.

13. Akkuliitântä

Vaikka pääsyöttöjännite onkin kahdennettu haluttiin järjestelmän toimivuus taata siinäkin tapauksessa, jos jännite kaapelin katkeamisen tai muun syyn takia häviää. Akun tuli olla mahdollisimman pitkäikäinen ja luotettava, ja sen lataaminen tuli olla mahdollista normaalikäytön aikana. Akun kapasiteetiksi määriteltiin 7 Ah ja jännitteeksi 24 V, minkä toteuttaminen onnistuu parhaiten Ni-CD-akulla.

Ni-CD-akun ominaisuuksiin valitettavasti kuuluu sen kapasiteetin häipyminen iän myötä mikäli akkua ei välillä pureta melko tyhjiin ja sen jälkeen taas ladata. Tätä ongelmaa pyritään korjaamaan purkamalla ja lataamalla akkua vuoron perään. Tällä tavalla pystytään akun käyttöikää pidentämään mutta joudutaan samalla toisen ongelman eteen: miten varmistua toiminnan jatkumisesta mikäli pääsyöttöjännite sattuu katkeamaan juuri sillä hetkellä, kun akun varaus on purkamisen vuoksi alhaisimmillaan? Tämä ongelma ratkaistiin lisäämällä toinen akku, jolloin toista akkua purettaessa toinen on täydessä latauksessaan. Latauksen ja purkamisen ohjaa keskusyksikkö akun jännitteen mittauksen ja valvontayksiköltä saamiensa komentojen perusteella kuvan 12.1 mukaisesti.

Purkauksen ja varauksen ohjaamiseen on käytössä neljä keskusyksikön nastaa, joiden tilakaavio on esitetty taulukossa 13.1. Varausvirta on rajoitettu 700 ja purkausvirta 35 milliampeeriin. Purkausvirta riippuu lineaarisesti akun napajännitteestä ja varausvirta pääsyöttöjännitteen tasosta. Nimellisjännite akun latauksessa on 26V, joka saadaan tasasuunnatusta 20 V:n pääsyöttöjännitteestä.

Mikäli pääsyöttöjännite syystä tai toisesta katkeaa kokonaan (molemmat kaapelit katkeavat), laitteisto jää sen akun varaan, joka sillä hetkellä on purettavana. Tämän takia on

suotavaa pitää aina jompaa kumpaa akkua purettavana. Koska purettavana olevassa akussa on todennäköisesti alhaisempi napajännite kuin toisessa akussa (jota joko ladataan tai joka on passiivisena), on suotavaa ohjata molemmat akut purettavaksi heti kun syöttöjännite havaitaan katkenneeksi. Tällöin laitteisto saa virran ensin siltä akulta, jolla on suurempi napajännite, kunnes virransyöttö tapahtuu tasaisesti molemmilta napajännitteiden tasaannuttua samoiksi. Pääsyöttöjännitteen katkeaminen havaitaan taulukon 13.2 osoittamalla tavalla. On muistettava, että PFAIL-linjat saavat merkityksen vasta, mikäli vastaava AEN-linja on ykköstilassa. Molempien päätehonsyöttölinjojen katkeaminen voidaan havaita siis vasta kun molemmat akut on asetettu purkuun.

Mikäli kumpikaan akku ei ole purettavana pääsyöttöjännitteen katketessa, laitteiston käyttöjännite laskee nopeasti, ja kun se on alle viiden voltin, keskusyksikkö saa vahtikoiralta RST-pulssin. Tämä saa aikaan sen, että CPU nostaa kaikki nastansa hetkellisesti ykköstilaan, myös akkuja ohjaavat, jolloin akut joutuvat purkutilaan ja laitteisto saa jälleen virtaa. Laitteisto joutuu ennen tätä kuitenkin ESD-tilaan hätäpysäytystä ohjaavan releen pitojännitteen alittuessa, mikä saattaa olla erittäin epätoivottava tilanne. Hyvä parannusehdotus olisi kytkeä vahtikoiran jännitetasen laskua tutkiva hälytyslinja suoraan akun ohjaukseen, jolloin akun varaan jäätäisiin aina pääsyöttöjännitteen katketessa, eikä ESD-tilaan jouduta edes vahigossa. Koe-laitteistossa tämä ongelma kierrettiin ohjelmallisesti: CPU huolehti siitä, että jompi kumpi akku on aina purettavana, ja mikäli huomataan pääsyöttöjännitteen katkeaminen, CPU ohjaa välittömästi myös toisen akun purettavaksi.

Toisella akulla voidaan ladata toista akkua, mikäli tämä katsotaan tarpeelliseksi. Tämä edellyttää kuitenkin, että lataavan akun napajännite on selvästi ladattavaa korkeampi.

Haitallista ei myöskään ole, mikäli sama akku on sekä purussa että latauksessa, joskin tehon kulutus jonkin verran tällöin kasvaa eikä sen tähden ole suotavaa.

LOAD0(1)	AENO(1)	tilanne
0	0	ei pureta eikä ladata akkuja
0	1	puretaan akkua 0(1)
1	0	ladataan akkua 0(1)
1	1	ei-toivottu tila

Taulukko 13.1 Akkujen lataus ja purkaminen

AENO(1)	PFAIL0(1)	tilanne
0	0	normaali tila (ei pureta)
0	1	epämääräinen tila
1	0	normaali tila (puretaan)
1	1	pääsyöttö 0(1) katkennut

Taulukko 13.2 Tehonsyötön vikadiagnostiikka

Akkuliitântä suunniteltiin niin, etteivät akut kytkettynäkään kuluta lainkaan virtaa ennenkuin pääsyöttöjännite on kytketty laitteistoon. Mikäli laitteisto halutaan varastoida niin, ettei akun varaus purkaudu varastoinnin aikana, akun johdot on irrotettava ennen pääsyöttöjännitteen katkaisemista - tämän jälkeen akun johdot voi jälleen kytkeä eikä varaus purkaudu.

14. Laitteiston käynnistys

Alkuasetuksella tarkoitetaan laitteiston asettamista tunnettuun perustilaan. Tällaista perustilaan asetusta tarvitaan käyttöjännitteessä tapahtuvien jännitetason muutoksien (erityisesti jännitteen kytkemisen) yhteydessä sekä keskusyksikön ohjelman palauttamiseen tunnettuun aloituskohtaan ohjelman sekoamisen sattuessa. Alkuasetus suoritetaan yleensä laitteistossa erityisesti tätä tehtävää hoitavan "vahtikoirapiirin" avulla. Vahtikoirapiiriksi valittiin helppokäyttöinen MAX691-piiri /21/, joka varmistaa sen, että alkuasetukseen vaadittava jyrkkäreunainen signaali toteutuu myös käyttöjännitteen noustessa hitaasti.

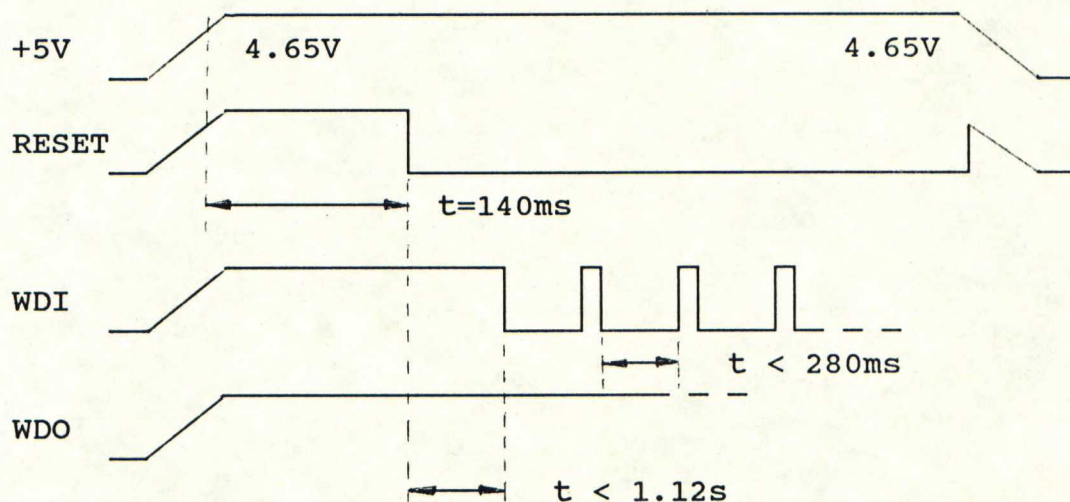
14.1 Keskusyksikön ja modeemipiirien alkuasetus

Keskusyksikön ja modeemipiirien alkuasetus tapahtuu aina samanaikaisesti vahtikoirapiirin RST-linjan laskevalla reunalla.

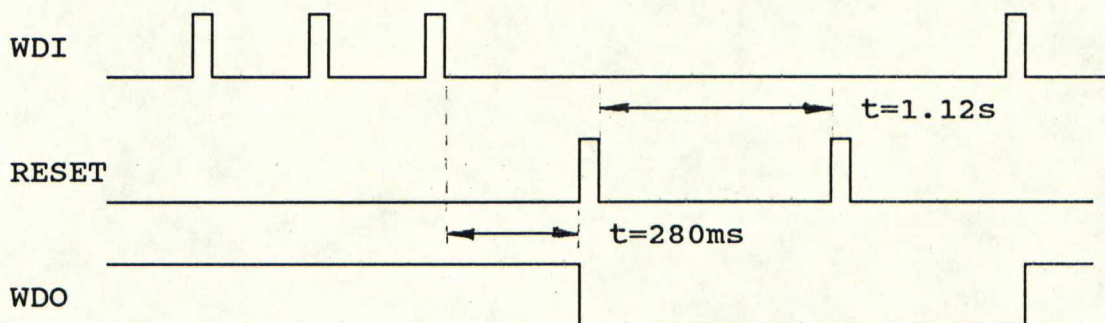
Kun alkuasetus tapahtuu käyttöjännitteen tasossa tapahtuvien muutosten vuoksi, puhutaan ns. kylmäkäynnistyksestä. Kylmäkäynnistys tapahtuu normaalisti jännitteen kytkeytyessä. Kun jännite nousee suuremmaksi kuin 4.65 V, vahtikoiria asettaa 140 millisekunnin kuluttua RST-linjan nollassi, jolloin keskusyksikkö ja modeemipiirit käynnistyvät. Viivettä voi säätää ulkoisella kondensaattorilla tarvittaessa; 140ms osoittautui sopivaksi viiveeksi koska LCA-piirien alkuasetus kestää noin 125 ms ja ne on alustettava ennen keskusyksiköä ja modeemeja, jotka saavat kellosignaalin LCA-piirien kautta. Kokeellisesti havaittiin, että mikäli keskusyksikön vaatima kellosignaali tuodaan piirille vasta alkuasetuksen jälkeen, piiri ei toimi johdonmukaisesti ensimmäisten kellojaksojen kuluessa. Kuvasta 14.1 käy ilmi kylmäkäynnistysajon ajoitus.

Kun alkuasetus tapahtuu keskusyksikön ohjelman sekoamisen vuoksi, puhutaan ns. kuumakäynnistyksestä. Vahtikoira tarkkailee ohjelman sekoamista tutkimalla keskusyksikön lähtönastaa (WDI, CTLBUS-väylä), jota ohjelmallisesti ohjataan vuoroin ykkös- ja nollatasoon. Vahtikoirapiirin ominaisuuksiin kuuluu, että mikäli normaalitoiminnan aikana WDI-linja ohjelman sekoamisen vuoksi jää joko nolla- tai ykköstasoon pidemmäksi aikaa kuin 280 ms:ksi, vahtikoira suorittaa kuumakäynnistyksen 50 ms:n pituisella RST-pulsilla. Tämän pulssin jälkeen (myös kylmäkäynnistyksessä) keskusyksiköllä on 1.12 sekuntia aikaa muuttaa WDI-linjan tasoa, joka normaalisti alkuasetuksen jälkeen asettuu nol-
latasoon. Mikäli WDI-linjan taso ei syystä tai toisesta vaihdu, alkuasetus tapahtuu 1.12 s välein. Kuva 14.2 ha-
vainnollistaa kuumakäynnistyksen ajoitusta.

Vahtikoira kykenee ilmoittamaan keskusyksikölle alkuasetuk-
sen syyn: Kylmäkäynnistyksessä vahtikoira asettaa WDO-
linjan ykköstasoon, kuumakäynnistyksessä WDO-linja sen si-
jaan asettuu nollatasoon. Näin keskusyksikkö voi seurata
alkuasetukseen johtaneita syitä ja ilmoittaa siitä edelleen
eteenpäin modeemilla valvontakeskukseen.



Kuva 14.1 Kylmäkäynnistys



Kuva 14.2 Kuumakäynnistys

14.2 LCA-piirien alkuasetus

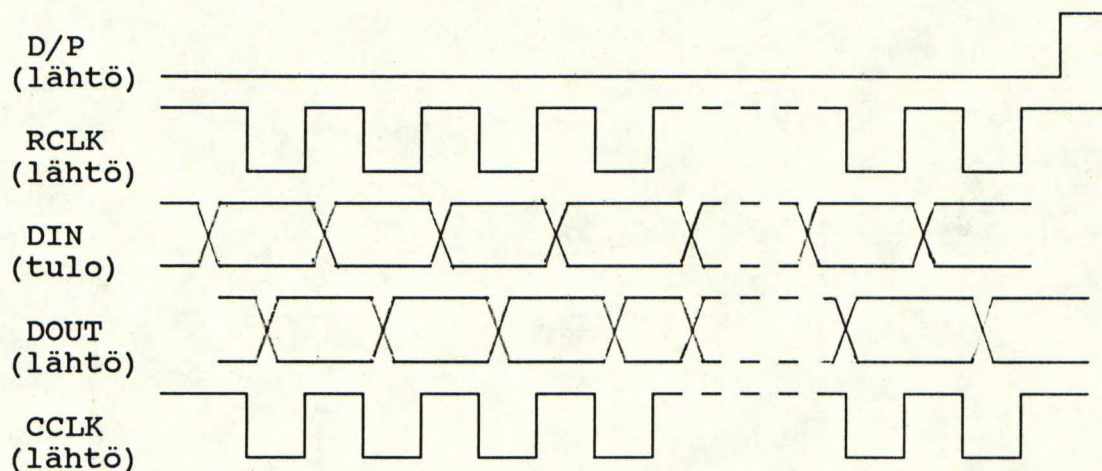
LCA-piirit (Logic Cell Array) huolehtivat itsensä alustamisesta käyttöjännitettä tutkimalla. Kun jännite nousee n. 3 voltin tasolle alkuasetus käynnistyy automaattisesti ja sen suoritus kestää n. 125 ms molemmilta piireiltä yhteensä. LCA:n alkuasetuksen on tapahduttava ennen keskusyksikön alkuasetusta sen vuoksi, että kellosignaali tulee LCA-piirin kautta. Kideoskillaaattori on rakennettu LCA-piirin yhteyteen ja johdotetaan edelleen eri linjoja pitkin CPU:lle ja molemmille modeemeille.

LCA-piirien alkuasetus tapahtuu lukemalla sarjamuotoisesti liikennöivältä lukumuistipiiriltä LCA-piirien toimintaan tarvittava konfiguraatio. Lukumuistipiirillä on molempien LCA-piirien sisältämä konfiguraatiotieto ja tieto luetaan ketjuttamalla piirit keskenään. LCA-piirin sisällä on valmiina kaikki se logiikka, joka tarvitaan lukumuistin lukemiseen ja alkuasetuksen läpiviemiseen, joten tähän ei tarvita lainkaan keskusyksikön apua. LCA-piirien alustuksessa käytetään ns. master serial-tapaa, joka asetetaan

piirin M0-, M1- ja M2-nastojen avulla. Nämä nastat on kortilla kytketty pysyvästi master serial-tilaan.

Lukumuistilta lukemiseen tarvitaan piirINVALINTA-, kello- ja datalinja. Kuvasta 14.3 käy ilmi LCA-piirin alkuasetuksessa käytössä olevien linjojen ajoitus. D/P-linjaa käytetään lukumuistipiirin valintaan.

LCA-piiri ilmoittaa keskusyksikölle alkuasetuksen tapahtuneen nostamalla D/P-linjan ykköstilään. Keskusyksikkö voi halutessaan käynnistää LCA-piirit uudestaan asettamalla saman signaalin (open drain-tyyppinen) nollatilaan. Tällöin on kuitenkin huomattava, että keskusyksikkö ei saa 125ms:n aikana kellosignaalia, jolloin ohjelman kulku estyy ja keskusyksikön tilaa ei tämän jälkeen voida varmasti tietää. Vahtikoira on tässä tapauksessa erittäin tarpeellinen. Open-drain lähdön vaatima ylös vetovastus on ohjelmoitu kätevästi LCA-piirin sisälle. Keskusyksikkö ei voi muuttaa LCA-piiriin luettua konfiguraatiota, vaan ainoa keino muuttaa sitä on vaihtaa kannalle sijoitettu lukumuistipiiri.



Kuva 14.3 LCA-piirin alustussekvenssi

15. Hätäpysäytys (ESD)

Eräät prosessit on kyettävä ohjaamaan laitteistossa tai ohjelmistossa esiintyvistä viasta huolimatta automaattisesti tiettyyn tunnettuun tilaan. Tällaisia vaatimuksia esiintyy prosesseissa, joiden ohjaaminen manuaalisesti on vaikeaa tai mahdotonta.

Työssä varauduttiin kolmeen erilaiseen keinoon suorittaa hätäpysäytys: Hallitusti joko valvomolta tulleeella käskyllä tai itsenäisesti esim. liikennöintiyhteyden katkettua sekä viimeisenä keinona hallitsemattomasti esim. ohjausyksikön CPU:n vikaantuessa.

15.1 Hallittu hätäpysäytys

Hallittu siirtyminen ESD-tilaan tapahtuu ohjelmallisesti ohjaamalla sitä tarkoitusta varten valittu ohjausyksikön digitaalilähtö nollatilaan.

Hallittu siirtyminen ESD-tilaan tapahtuu joko modeemin kautta tulleeella komennolla tai mikäli modeemiyhteys katkeaa, itsenäisesti tietyn viiveen kuluttua. ESD-lähdölle on keskusyksikölle varattu kaksi omaa erillistä linjaa: SETESD ja CLESD, toinen asetusta ja toinen nollausta varten.

Laitteisto asettuu automaattisesti ESD-tilaan aina välittömästi kylmäkäynnistyksen jälkeen. Tämä ominaisuus johtuu LCA-piirin LDC-nastasta (Low During Configuration), joka on kytketty suoraan ESD-lähtöä ohjaavaan transistoriin. Nimensä mukaisesti LDC on nollatasossa LCA-piirien alustuksen aikana, joka tapahtuu aina kylmäkäynnistyksen yhteydessä. LCA-piiri on ohjelmoitu siten, että LDC-nasta myöskin jää ESD-tilaan siihen asti kunnes keskusyksikkö asettaa CLESD-linjan nollatasoon. (LCA piirin muut nastat ovat

alustuksen aikana high impedance-tilassa, joten LDC-nasta on omiaan ESD-lähdön ohjaukseen.)

15.2 Hallitsematon hätäpysäytys

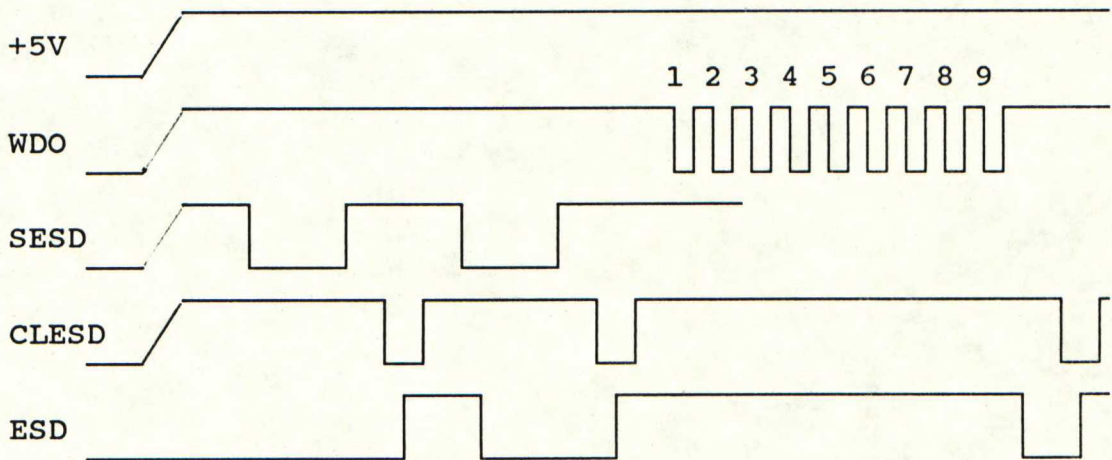
Ajautuminen hallitsemattomasti ESD-tilaan tarkoittaa ESD-lähdön ohjaamista nollatilaan ilman keskusyksikön erillistä käskyä.

Hallitsemattomaan ESD-tilaan joudutaan vain laitteistossa tai ohjelmistossa esiintyvän vian takia. Eräs tällainen vika on ohjelman sekoamisesta johtuvat toistuvat kuumakäynnistykset, joiden takia ohjausyksikkö on epämääräisessä tilassa. Kuumakäynnistyksen vuoksi ajaudutaan ESD-tilaan - ei kuitenkaan välittömästi kuten kylmäkäynnistyksessä. LCA-piirin sisälle ohjelmoitiin laskuri, joka laskee kuumakäynnistyksien lukumäärää. Kun laskurin arvo on yhdeksän, se ohjaa ESD-lähdön nollatilaan. Jos kuumakäynnistyksiä tapahtuu harvoin, CPU ehtii ilmoittaa siitä modeemilla valvontayksikölle, ja sieltä tulevalla komennolla ohjausyksikkö voi nollata laskurin. Nollaus tapahtuu keskusyksikön asettaessa CLESD-linjan nollatasoon. Tällainen ominaisuus on tarpeen, jos laitteistossa tapahtuu satunnainen kuumakäynnistys esim. huollon yhteydessä. Mikäli kuumakäynnistyksiä tapahtuu nopeammin kuin valvontayksikkö ehtii saada niistä ilmoituksia, joudutaan väistämättä ESD-tilaan.

ESD-tilaan joudutaan hallitsemattomasti myös käyttöjännitteen katketessa. Tämä tilanne on kuitenkin melko epätodennäköinen tilanne kahdennetun tehonsyötön ja kahdennetun varatehonsyötön ansiosta. Mikäli tuotantoa kuitenkin joudutaan pitkään ohjaamaan akkujen varassa, käyttöjännite vähitellen putoaa. Kun ESD-lähdön syöttöjännite lopulta alittaa siihen kytketyn releen pitojännitteen, ajaudutaan hallitsemattomaan ESD-tilaan. Päätehonsyötön katkeaminen aiheuttaa myös hallitsemattoman ESD-tilan, ellei toinen

tai molemmat akut ole purkauksessa.

Hallitsemattomaan ESD-tilaan joudutaan myös siinä tapauksessa, että keskusyksikön ohjelmisto sekoaa hetkeksikin siten, että sen SESD-linja käy nollassa. Myös laitteistollinen vika saattaa johtaa tähän silloin, kun SESD-linjaa ohjaava keskusyksikön tai LCA-piirin sisällä oleva transistori vikaantuu. Myös ESD-lähtöä ohjaavan transistorin drain-source-katkos voi aiheuttaa hallitsemattoman ESD-tilan. Kuvassa 15.1 on esitetty ESD:n toiminta ajoituskaaviona.



Kuva 15.1 ESD:n toiminta

16. Yhteenveto

Kokeiltaessa suunniteltua ohjausjärjestelmää käytännössä kuvan 2.1 mukaisella kytkennällä, se todettiin toimivaksi kokonaisuudeksi. Modeemiyhteys toimi moitteetta hyvin pitkästä 25 km:n kaapelista huolimatta vaikka ylikuulumis-ilmiön saattoi olettaa aiheuttavan ongelmia saman vaipan sisällä kulkevaan moninkerroin edestakaisin kulkevaan signaaliin.

Ohjausjärjestelmän ohjelmisto onnistuttiin toteuttamaan niin, että sekunnin vasteaikaan/yksikkö päästiin. Tästä nopeuttaminen vaatii melko toisenlaista ratkaisua laitteistoon, esim. nopeamman modeemin ja tehokkaamman CPU:n. LCA-piirien käyttö onnistui yli odotusten. Käytetyn kahden piirin suunnittelu onnistuu nopeasti mikäli piirieditorien (esim. DASH, Schema II, OrCAD) käyttö on ennestään tuttua.

Työ antoi runsaasti tietoa ja kokemusta luotettavuustekniikasta ja sen käytäntöön soveltamisesta. Laitteiston luotettavuuden todentamista ei laajemmassa mittakaavassa yritetty. Yhdelle ohjausyksikölle suoritettiin VTT:n kanssa suunniteltu IEC-68-2-standardiin pohjautuva ympäristörasitustesti, jonka laite läpäisi moitteeta. Käytetyn väyläratkaisun vaikutuksesta luotettavuuteen käytännössä ei saatu todisteita, vaikka luotettavuuden mallintaminen helpottuikin. Väyläratkaisun haittapuolena voidaan pitää ohjelmiston vaikeutumista, joka osaltaan heikentää luotettavuutta. Erityisesti joustavuusvaatimukset aiheuttivat ongelmia tehokkaan ohjelmiston suunnittelemiseksi. Melko yksinkertaisiin sovelluksiin tarkoitettu CPU joutui toimimaan kapasiteettinsa ylärajoilla.

Luotettavuuslaskelmien tulos vaihtelee erittäin paljon riippuen laskentamenetelmästä. Työssä tutkitulla vertaillevalla laskentamenetelmällä saatu elinikä oli n. 20 kertaa

parempi kuin puhtaasti MIL-HDBK-217E:n mukaisella laskelmalla. Kumpaakaan laskelmaa ei voitu osoittaa toistaan totuudenmukaisemmaksi, joten laskelmien on syytä olla suuntaa-antavia sekä toimia paremminkin suunnittelun apuvälineenä kuin tuotemäärittelyyn kuuluvana spesifikaationa.

17. Lähdeluettelo

- /1/ Maljanen, J. Hajautetun ohjauskeskuksen tiedonsiirto pienjänniteverkostossa, Espoo 1987, Teknillinen Korkeakoulu, Seminaariesitelmä. 23 s.
- /2/ Jääskeläinen, P. Elektroniikan luotettavuus. Espoo 1977, Otakustantamo. 151 s.
- /3/ Department of Defense USA. MIL-HDBK-217E, Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment, Washington DC 1986, Department of Defense
- /4/ Motorola. European Military, Space & Hi-Rel Manual, Great Britain 1986, Motorola Corp. 103 s.
- /5/ National Semiconductor. Reliability Handbook, New York 1987, National Semiconductor Corp. 281 s.
- /6/ Pulli, T. Elektroniikan komponenttien luotettavuusvuustietojen määrittäminen, Espoo 1984, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 337. 21 s.
- /7/ Motorola, CMOS Data Manual Volume 3, Switzerland 1983, Motorola Corp.
- /8/ O'Connor, Patrick D.T. Practical Reliability Engineering, 2. p. Great Britain 1981, John Wiley & Sons Ltd. 398 s.
- /9/ Pulli, T. Elektroniikan komponenttien luotettavuusmallit, Espoo 1984, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 338. 33 s.
- /10/ KOTEL työryhmä 5, Rasituskarsinta, Espoo 1986, Elektroniikan tutkimuksen ja kehityksen yhteistyöelin KOTEL ry, Tutkimusraportti 182, 33 s.
- /11/ Edwards, D.G. Testing for MOS IC failure modes, IEEE Trans. Reliab. R-31(1982)1, s. 9 - 17 .
- /12/ Blanks, H.S. The temperature dependency of component failure rate, Microelectronics & Reliability 20(1980), s. 297 - 307.
- /13/ Rosenberg, S. Intel 2716 16K UV erasable prom, Santa Clara 1979, Intel Reliability Report, RR-19. 11 s.

- /14/ Brown, D.A. iAPX 86, 88 microprocessor family, Santa Clara 1981, Intel Reliability Report, RR-27. 12 s. + liitt. 26.
- /15/ Intel. Components Quality/Reliability Handbook Santa Clara 1987, Intel Corp.
- /16/ Department of Defense USA. MIL-HDBK-338, Military Handbook 338, Washington DC 1984, Department of Defense.
- /17/ Intel. Embedded Controller Handbook, Volume II, Santa Clara 1988, Intel Corp.
- /18/ Silicon Systems. SSI K222 v.22, v.21, Bell 212A Single-chip Modem. Tustin 1986, Silicon Systems Inc. 20 s.
- /19/ Xilinx. The Programmable Gate Array Data Book. USA 1988, Xilinx Inc.
- /20/ Xicor. Data Book. USA 1987, Xicor Inc.
- /21/ Maxim. Analog Data Acquisition Applications Seminar. USA 1987.
- /22/ VTT. Elcom Manual. Espoo 1988, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 75 s.

Liite 1/1 Luotettavuuslaskelma 1

 * ELCOM-E FAILURE RATE LISTING *
 * Technical Research Centre of Finland *

Ohjausyksikön luotettavuuslaskelma/yhteenvedo Elcom-ohjelman mukaan. /22/
 Laskelmassa on käytetty puhtaasti MIL-HDBK-217E:n mallia.

NAME	BLOCK	Class	Psr%	Vsr%	Isr%	TJ	FIT/comp.
=====							
RL500*6	/ Curr.limit	Resistor	40	--	--	--	41.3
RL500	/ "	Resistor	100	--	--	--	82.2
2N2906A	/ "	Transistor	5	43	--	--	4.1
2N6052*2	/ "	Transistor	5	26	--	--	0.2
RL500	/ Power A(B)	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500*4	/ "	Resistor	40	--	--	--	41.3
RL500*2	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500*2	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500*8	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	46.9
PK63	/ "	Capacitor	--	41	--	--	74.4
2222/123	/ "	Capacitor	--	25	--	--	291.5
2222/123	/ "	Capacitor	--	31	--	--	454.0
EHF63	/ "	Capacitor	--	41	--	--	885.6
MDA970G5*4	/ "	Diode	--	21	13	--	5.8
1N5615*2	/ "	Diode	--	100	100	--	1.8
1N5629A	/ "	Diode	1	--	100	--	2.1
1N5645A	/ "	Diode	1	--	100	--	2.1
IRF220BD*6	/ "	Diode	--	6	13	--	50.9
2N2222A*2	/ "	Transistor	5	65	--	--	0.3
2N2222A*2	/ "	Transistor	5	25	--	--	0.2
2N2906A	/ "	Transistor	5	83	--	--	6.5
2N3868	/ "	Transistor	5	43	--	--	0.8
IRF230	/ "	Transistor	5	--	--	--	52.8
IRF230	/ "	Transistor	5	--	--	--	1159.0
LT311	/ "	IC	10	--	--	46	407.4
LM317	/ "	IC	10	--	--	46	63.8
RL500	/ Modem A(B)	Resistor	10	--	--	--	46.9
PK63*2	/ "	Capacitor	--	8	--	--	50.1
PK63	/ "	Capacitor	--	8	--	--	34.3
K222L	/ "	IC	10	100	--	44	733.8
PK63	/ Switch	Capacitor	--	8	--	--	34.3
74HC4052	/ "	IC	10	--	--	47	654.6
RL500	/ Buff 0(1)	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500*2	/ "	Resistor	10	--	--	--	32.2
CK63*2	/ "	Capacitor	--	8	--	--	0.4
CK63	/ "	Capacitor	--	8	--	--	0.4
CK63	/ "	Capacitor	--	8	--	--	0.9
PK63*2	/ "	Capacitor	--	2	--	--	50.1
PK63*3	/ "	Capacitor	--	41	--	--	74.4
PK63	/ "	Capacitor	--	11	--	--	50.2
1N6042A	/ "	Diode	1	--	100	--	2.1
LT1010	/ "	IC	10	--	--	46	72.4
LT1013	/ "	IC	10	--	--	44	369.9
LT317H	/ "	IC	10	--	--	52	92.7
RL500	/ Buff 2(3)	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500*2	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500*2	/ "	Resistor	10	--	--	--	29.3

Liite 1/2 Luotettavuuslaskelma 1

RL500*2	/	"	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/	"	Resistor	10	--	--	--	32.2
CK63	/	"	Capacitor	--	8	--	--	0.4
CK63	/	"	Capacitor	--	8	--	--	0.4
CK63	/	"	Capacitor	--	2	--	--	0.7
PK63*2	/	"	Capacitor	--	2	--	--	50.1
PK63*2	/	"	Capacitor	--	8	--	--	34.3
1N6042A	/	"	Diode	1	--	100	--	2.1
LT1014	/	"	IC	10	--	--	44	5.5
RL500	/	LCA	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/	"	Resistor	10	--	--	--	46.9
CK63*2	/	"	Capacitor	--	8	--	--	0.3
PK63*5	/	"	Capacitor	--	8	--	--	34.3
XC2064*2	/	"	IC	10	100	--	43	2664.0
XC1736	/	"	IC	10	100	--	45	0.0
QUARTZ11	/	"	Misc	--	--	--	--	146.7
RL500	/	CPU	Resistor	10	--	--	--	29.3
RZ500	/	"	Resistor	10	--	--	--	140.2
CK63	/	"	Capacitor	--	8	--	--	0.4
PK63*3	/	"	Capacitor	--	8	--	--	34.3
MAX691	/	"	IC	10	--	--	46	685.3
87C51	/	"	IC	10	100	--	45	1060.3
X2404	/	"	IC	10	100	--	45	915.8
RL500	/	ADC	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/	"	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/	"	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500*2	/	"	Resistor	10	--	--	--	29.3
RZ500	/	"	Resistor	10	--	--	--	122.7
PK63*5	/	"	Capacitor	--	8	--	--	34.3
TLC541	/	"	IC	10	100	--	45	860.1
AD580	/	"	IC	10	--	--	41	47.3
RL500*32	/	CONN	Resistor	10	--	--	--	29.3
1N5522A*32	/	"	Diode	1	--	100	--	2.1
EURCONN	/	CONNECTOR	Connector	--	--	--	--	15.0
LOWCON*2	/	"	Connector	--	--	--	--	14.7
SOCKET68*2	/	"	Connector	--	--	--	--	21.5
SOCKET40	/	"	Connector	--	--	--	--	11.4
JUMP	/	BOARD	Board/Conn	--	--	--	--	0.3
PCB1500.4	/	"	Board/Conn	--	--	--	--	48.9
RL500	/	DFU	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500*2	/	"	Resistor	10	--	--	--	29.3
RL500	/	"	Resistor	10	--	--	--	29.3
PK63*5	/	"	Capacitor	--	8	--	--	34.3
PK63*5	/	"	Capacitor	--	41	--	--	74.4
2222/123	/	"	Capacitor	--	31	--	--	454.0
EHF63	/	"	Capacitor	--	41	--	--	1014.5
2N6788*60	/	"	Transistor	5	--	--	--	1.1
2N6788	/	"	Transistor	5	--	--	--	1.1
1N5615*62	/	"	Diode	--	100	0	--	0.2
1N6263	/	"	Diode	--	100	100	--	29.3
1N5907	/	"	Diode	1	--	100	--	10.5
1N5645A	/	"	Diode	1	--	100	--	2.1
LT311	/	"	IC	10	--	--	46	407.4
74HC4514*4	/	"	IC	10	--	--	45	939.5
74HC02	/	"	IC	10	--	--	45	552.9
EURCONN	/	"	Connector	--	--	--	--	15.0
LOWCON*2	/	"	Connector	--	--	--	--	12.8
PCB700.2	/	"	Board/Conn	--	--	--	--	1.5

Liite 1/3 Luotettavuuslaskelma 1

=====	F	I	T=====	%	=
22x IC		16015		61.5	
71x Transistor		1291		5.0	
113x Diode		461		1.8	
90x Resistor		3076		11.8	
53x Capacitor		4879		18.7	
9x Connector		139		0.5	
3x Board/Conn		51		0.2	
1x Misc		147		0.6	

362	Total	26059		100.0%	

MTBF 38374 h 4.4 y

Tämä laskelma ei ota huomioon kahdennuksia, vaan olettaa jokaisen komponentin vikaantumisen yhtä kriittiseksi.

PSR% = tehorasitus

VSR% = jänniterasitus

ISR% = virtarasitus

TJ = puolijohteen lämpötila (mikäli eri kuin
ulkoinen lämpötila, joka on 40° C)

Liite 2/1 Luotettavuuslaskelma 2

 * ELCOM-E FAILURE RATE LISTING *
 * Technical Research Centre of Finland *

Ohjausyksikön luotettavuuslaskelma/yhteenveto Elcom-ohjelman mukaan. /22/
 Laskelmassa on käytetty hyväksi laatu-kertoimen modifiointia.

NAME	CODE	Class	Psr%	Vsr%	Isr%	TJ	FIT/comp.
RL500*6	/ Curr.limit	Resistor	40	--	--	--	0.4
RL500	/ "	Resistor	100	--	--	--	0.8
2N2906A	/ "	Transistor	5	43	--	--	4.1
2N6052*2	/ "	Transistor	5	26	--	--	0.2
RL500	/ Power A(B)	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500*4	/ "	Resistor	40	--	--	--	0.4
RL500*2	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500*2	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500*8	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.5
PK63	/ "	Capacitor	--	41	--	--	7.4
2222/123	/ "	Capacitor	--	25	--	--	0.9
2222/123	/ "	Capacitor	--	31	--	--	1.4
EHF63	/ "	Capacitor	--	41	--	--	8.9
MDA970G5*4	/ "	Diode	--	21	13	--	5.8
1N5615*2	/ "	Diode	--	100	100	--	1.8
1N5629A	/ "	Diode	1	--	100	--	2.1
1N5645A	/ "	Diode	1	--	100	--	2.1
IRFZ20BD*6	/ "	Diode	--	6	13	--	0.4
2N2222A*2	/ "	Transistor	5	65	--	--	0.3
2N2222A*2	/ "	Transistor	5	25	--	--	0.2
2N2906A	/ "	Transistor	5	83	--	--	6.5
2N3868	/ "	Transistor	5	43	--	--	0.8
IRFZ30	/ "	Transistor	5	--	--	--	1.1
IRFZ30	/ "	Transistor	5	--	--	--	2.4
LT311	/ "	IC	10	--	--	46	5.1
LM317	/ "	IC	10	--	--	46	5.6
RL500	/ Modem A(B)	Resistor	10	--	--	--	0.5
PK63*2	/ "	Capacitor	--	8	--	--	5.0
PK63	/ "	Capacitor	--	8	--	--	3.4
K222L	/ "	IC	10	100	--	44	27.2
PK63	/ Switch	Capacitor	--	8	--	--	3.4
74HC4052	/ "	IC	10	--	--	47	8.2
RL500	/ BUFF 0(1)	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500*2	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
CK63*2	/ "	Capacitor	--	8	--	--	0.4
CK63	/ "	Capacitor	--	8	--	--	0.4
CK63	/ "	Capacitor	--	8	--	--	0.9
PK63*2	/ "	Capacitor	--	2	--	--	5.0
PK63*3	/ "	Capacitor	--	41	--	--	7.4
PK63	/ "	Capacitor	--	11	--	--	5.0
1N6042A	/ "	Diode	1	--	100	--	2.1
LT1010	/ "	IC	10	--	--	46	1.2
LT1013	/ "	IC	10	--	--	44	2.8
LT317H	/ "	IC	10	--	--	52	8.1
RL500	/ BUFF 2(3)	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500*2	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500*2	/ "	Resistor	10	--	--	--	0.3

Liite 2/2 Luotettavuuslaskelma 2

RL500*2	/	"	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/	"	Resistor	10	--	--	--	0.3
CK63	/	"	Capacitor	--	8	--	--	0.4
CK63	/	"	Capacitor	--	8	--	--	0.4
CK63	/	"	Capacitor	--	2	--	--	0.7
PK63*2	/	"	Capacitor	--	2	--	--	5.0
PK63*2	/	"	Capacitor	--	8	--	--	3.4
1N6042A	/	"	Diode	1	--	100	--	2.1
LT1014	/	"	IC	10	--	--	44	5.5
RL500	/	LCA	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/	"	Resistor	10	--	--	--	0.5
CK63*2	/	"	Capacitor	--	8	--	--	0.3
PK63*5	/	"	Capacitor	--	8	--	--	3.4
XC2064*2	/	"	IC	10	100	--	43	2.7
XC1736	/	"	IC	10	100	--	45	0.0
QUARTZ11	/	"	Misc	--	--	--	--	146.7
RL500	/	CPU	Resistor	10	--	--	--	0.3
RZ500	/	"	Resistor	10	--	--	--	46.7
CK63	/	"	Capacitor	--	8	--	--	0.4
PK63*3	/	"	Capacitor	--	8	--	--	3.4
MAX691	/	"	IC	10	--	--	46	34.3
87C51	/	"	IC	10	100	--	45	127.2
X2404	/	"	IC	10	100	--	45	52.7
RL500	/	ADC	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/	"	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/	"	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500*2	/	"	Resistor	10	--	--	--	0.3
RZ500	/	"	Resistor	10	--	--	--	40.9
PK63*5	/	"	Capacitor	--	8	--	--	3.4
TLC541	/	"	IC	10	100	--	45	6.5
AD580	/	"	IC	10	--	--	41	2.5
RL500*32	/	CONN	Resistor	10	--	--	--	0.3
1N5522A*32	/	"	Diode	1	--	100	--	2.1
EURCONN	/	CONNECTOR	Connector	--	--	--	--	15.0
LOWCON*2	/	"	Connector	--	--	--	--	14.7
SOCKET68*2	/	"	Connector	--	--	--	--	21.5
SOCKET40	/	"	Connector	--	--	--	--	11.4
JUMP	/	BOARD	Board/Conn	--	--	--	--	0.3
PCB1500.4	/	"	Board/Conn	--	--	--	--	48.9
RL500	/	DFU	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500*2	/	"	Resistor	10	--	--	--	0.3
RL500	/	"	Resistor	10	--	--	--	0.3
PK63*5	/	"	Capacitor	--	8	--	--	3.4
PK63*5	/	"	Capacitor	--	41	--	--	7.4
2222/123	/	"	Capacitor	--	31	--	--	1.4
EHF63	/	"	Capacitor	--	41	--	--	10.1
2N6788*60	/	"	Transistor	5	--	--	--	1.1
2N6788	/	"	Transistor	5	--	--	--	1.1
1N5615*62	/	"	Diode	--	100	0	--	0.2
1N6263	/	"	Diode	--	100	100	--	29.3
1N5907	/	"	Diode	1	--	100	--	10.5
1N5645A	/	"	Diode	1	--	100	--	2.1
LT311	/	"	IC	10	--	--	46	5.1
74HC4514*4	/	"	IC	10	--	--	45	7.0
74HC02	/	"	IC	10	--	--	45	4.1
EURCONN	/	"	Connector	--	--	--	--	15.0
LOWCON*2	/	"	Connector	--	--	--	--	12.8
PCB700.2	/	"	Board/Conn	--	--	--	--	1.5

Liite 2/3 Luotettavuuslaskelma 2

=====F I T===== % =		
22x IC	329	26.8
71x Transistor	83	6.8
113x Diode	157	12.8
90x Resistor	116	9.4
53x Capacitor	205	16.7
9x Connector	139	11.4
3x Board/Conn	51	4.1
1x Misc	147	12.0

361 Total	1227	100.0%

MTBF 814937 h 93.0 y

Tämä laskelma ei ota huomioon kahdennuksia, vaan olettaa jokaisen komponentin vikaantumisen yhtä kriittiseksi.

PSR% = tehorasitus

VSR% = jänniterasitus

ISR% = virtarasitus

TJ = puolijohteen lämpötila (mikäli eri kuin
ulkoinen lämpötila, joka on 40° C)